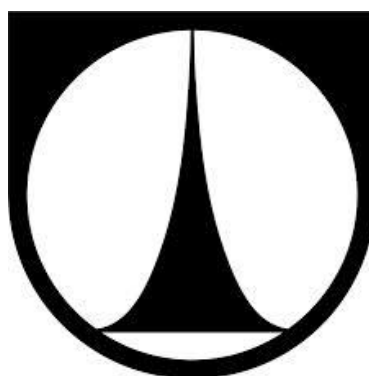


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní



TERMOAKUSTICKÉ CHLADÍCÍ ZAŘÍZENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Liberec 2016

Tomáš Koňářík



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Katedra energetických zařízení

TERMOAKUSTICKÉ CHLADÍCÍ ZAŘÍZENÍ (THERMOACOUSTIC COOLING DEVICE)

Bakalářská práce

<i>Studijní program:</i>	B2301 – Strojní inženýrství
<i>Autor práce:</i>	Tomáš Koňářík
<i>Vedoucí práce:</i>	Doc. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.

Liberec 2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš Koňářík**
Osobní číslo: **S11000068**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Termoakustické chladicí zařízení**
Zadávající katedra: **Katedra energetických zařízení**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je návrh jednoduchého termoakustického chladicího zařízení a provedení základních experimentů. Bakalářská práce bude mít převážně experimentální charakter.

Bakalářská práce by měla odpovídat následující struktuře:

1. Rešerše prací, které se zabývají zvolenou problematikou.
2. Návrh a realizace experimentálního zařízení.
3. Provedení experimentů.
4. Analýza a diskuse výsledků.

Rozsah grafických prací: **10**
Rozsah pracovní zprávy: **35 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**
Seznam odborné literatury:

[1] **SWIFT, G.,W., 1988.** *Thermoacoustic engine*, JASA, Vol.84, No. 4.
<http://www.lanl.gov/thermoacoustics/>

[2] **RIEGER, F., ŠESTÁK, J., 1996.** *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. ČVUT Praha.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.**
Katedra energetických zařízení

Datum zadání bakalářské práce: **18. listopadu 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **18. února 2017**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 18. listopadu 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se vztahuje zákon č.121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.


Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL), nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci, nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL, v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

V Liberci 8. července 2016

Podpis. 

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. Applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a license for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I complied the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and the consultant.

At the same time I affirm that the printed version of the thesis coincides with an electronic version inserted into the IS STAG.

In Liberec July 8th, 2016

Signature. 

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi pomohli s tvorbou mé bakalářské práce. Zvláště pak doc. Ing. Tomáši Vítovi Ph.D. za konzultace a v neposlední řadě Ing. Tomáši Tisovskému za pomoc s návrhem v programu DeltaEC.

Mé díky patří také mé rodině, přítelkyni a přátelům za jejich podporu při studiu.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je navrhnout jednoduché termoakustické chladicí zařízení. V práci je popsána historie termoakustiky s popisem několika uskutečněných aplikací termoakustických chladících zařízení. Dále jsou stručně uvedeny teoretické základy termodynamiky a termoakustického jevu. Návrh vychází ze zkušeností s termoakustikou na katedře energetických zařízení a jsou diskutovány možné varianty při návrhu vhodné konstrukce. V další části je detailně popsán výsledný návrh. Práce obsahuje výkresovou dokumentaci pro výrobu a sestavení experimentálního modelu jednoduchého termoakustického chladicího zařízení.

Klíčová slova

Termoakustické zařízení, termoakustika, stack, rezonátor, chlazení, tepelné čerpadlo.

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to design simple thermoacoustic cooling device. The thesis describes the history of thermoacoustics with a description of several underlying applications of thermoacoustic cooling devices. Furthermore, there are briefly presented the theoretical foundations of thermodynamics and thermoacoustic phenomenon. The proposal builds on the experience with thermoacoustics in the Department of Energy Facilities and discuss possible variations in the design of a convenient structure. In the next part is described in detail the final design. Work includes drawings for manufacture and construct of experimental model of a simple thermoacoustic refrigeration device.

Key words

Thermoacoustic device, thermoacoustics, stack, resonator, cooling, heat pump.

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	8
Seznam obrázků a tabulek.....	10
1. Úvod.....	11
1.1 Úvod do termoakustiky.....	12
1.2 Historie a využití termoakustiky.....	14
2. Teorie termoakustiky	17
2.1 Termodynamika	17
2.2 Chladicí faktor	18
2.3 Zvukové vlny a tlak	19
2.4 Stojaté vlnění	19
2.5 Termoakustický jev ve stacku	20
3. Základní komponenty	24
3.1 Akustický zdroj.....	24
3.2 Rezonátor.....	28
3.3 Stack	28
3.4 Tepelné výměníky	29
3.5 Plynné médium	30
4. Návrh	31
4.1 Termoakustika na TUL.....	31
4.2 Prvotní návrhy	32
4.3 Výsledný návrh.....	34
4.4 Volba konstrukčního materiálu.....	35
4.5 Popis komponentů výsledného zařízení.....	36
5. Závěr.....	41
Seznam použitých zdrojů	42
Seznam příloh	44

Seznam použitých symbolů

δ_k	[m]	tepelná penetrační hloubka
δ_v	[m]	viskózní penetrační hloubka
k_g	[W / (m · K)]	tepelná vodivost plynu
ρ	[kg / m ³]	hustota
c	[J / (Kg · K)]	měrná tepelná kapacita
c_p	[J / (Kg · K)]	měrná tepelná kapacita izobarická
c_v	[J / (Kg · K)]	měrná tepelná kapacita izochorická
ω	[rad / s]	úhlová frekvence
ν	[m ² / s]	kinematická viskozita
λ	[m]	vlnová délka
λ_q	[W / (m · K)]	tepelná vodivost
L_p	[dB]	hladina akustického tlaku
p	[Pa]	tlak
p_m	[Pa]	tlak pracovního média
p_0	[Pa]	referenční akustický tlak
p_{ef}	[Pa]	efektivní hodnota akustického tlaku
f	[Hz]	frekvence
f_s	[Hz]	rezonanční frekvence
l	[m]	délka rezonátoru
κ	[I]	Poissonova konstanta
R	[J / (mol · K)]	molární plynová konstanta
M	[kg / mol]	molekulová hmotnost

a	$[m / s]$	rychlost zvuku
V	$[m^3]$	objem
u	$[m / s]$	rychlost
ρ_m	$[kg / m^3]$	střední hustota pracovního plynu
y_0	$[m]$	polovina šířky kanálku stacku
ε_{ch}	$[I]$	chladicí faktor
x_1	$[m]$	amplituda vychýlení částice plynu
x_s	$[I]$	poloha středu stacku vůči rezonátoru
x	$[m]$	souřadnice v podélném směru
T	$[K]$	termodynamická teplota
T_c	$[K]$	teplota chladného konce stacku
T_H	$[K]$	teplota horkého konce stacku
W	$[J]$	práce
\dot{W}	$[W]$	tok práce
\dot{Q}_c	$[W]$	tepelný tok chladného konce
\dot{Q}_H	$[W]$	tepelný tok horkého konce
Q_c	$[J]$	teplo chladného konce
Q_H	$[J]$	teplo horkého konce

Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1.1: Vlastní model Stirlingova motoru.....	12
Obrázek 1.2: (a) Higginsův „zpívající plamen“, (b) Rijkova trubice ^[2]	14
Obrázek 1.3: Sondhaussova trubice ^[2]	15
Obrázek 1.4: Termoakustický chladič Triton využívaný americkým námořnictvem ^[7]	16
Obrázek 2.1: Tok tepla a práce v TA systémech (a) motoru a (b) tepelného čerpadla ^[10] ...	17
Obrázek 2.2: Odraz vlnění na pevné překážce a vzniklé stojaté vlnění ^[12]	19
Obrázek 2.3: Obrácený Ericson-Braytonův cyklus ^[9]	21
Obrázek 2.4: Chování elementárního objemu plynu ve stacku ^[7]	22
Obrázek 2.5: Znázornění přenosu tepla v délce stacku na jedné destičce ^[7]	22
Obrázek 2.6: Průběh rychlosti a tlaku v půlplnovém TA chladicím zařízení ^[7]	23
Obrázek 3.1: Různé piezokeramické komponenty ^[13]	25
Obrázek 3.2: Varianty piezokeramických ^[17]	26
Obrázek 3.3: Piezokeramický pohon ^[18]	26
Obrázek 3.4: Popis elektrodynamického přímovyzahujícího reproduktoru (řez) ^[19]	27
Obrázek 3.5: Popis elektrodynamického tlakového reproduktoru (řez) ^[20]	27
Obrázek 3.6: Konstrukční varianty stacku ^[15]	29
Obrázek 3.7: Umístění tepelných výměníků vůči stacku ^[7]	29
Obrázek 3.8: Přenos tepla plynem mezi stackem a tepelnými výměníky ^[7]	30
Obrázek 4.1: Malý TA motor na KEZ.....	31
Obrázek 4.2: Velký TA motor na KEZ ^[22]	31
Obrázek 4.3: Návrh číslo 1.....	32
Obrázek 4.4: Návrh číslo 2.....	33
Obrázek 4.5: Schéma Čtvrtplnového TA chladicího zařízení ^[11]	34
Obrázek 4.6: Pohled na čtvrtinový řez části zařízení.....	37
Obrázek 4.7: Přejít z desek a plynulý přechod.....	38
Obrázek 4.8: Uspořádání tepelných výměníků a chladičů.....	39
Obrázek 4.9: Pohled z boku na TA chladicího zařízení.....	40
Tabulka 1: Počáteční parametry navrženého TA chladicího zařízení T. Tisovským ^[11]	34
Tabulka 2: Materiálové vlastnosti PMMA (GS - lité, XT - extrudované) ^[21]	35

1. Úvod

Od samotného počátku lidstva bylo vždy nezbytné pro přežití a rozkvět lidských civilizací zkrocení přírodních živlů a forem energií obklopujících naše životní prostředí. Lidé začali přemýšlet nad využíváním svého okolí k vlastnímu prospěchu a ulehčení jejich životů. Již od podmanění ohně a využívání jednoduchých nástrojů se nedá technický vývoj a touha po objevení něčeho nového zastavit. Formy energií kolem nás jsou již od počátků stejné, lidé však během své dlouhé cesty za poznáním dokázali vytvořit sofistikovaná zařízení na její přeměny a efektivnější využívání zdrojů ve svůj prospěch. Tímto se dostáváme do současnosti, kdy máme k dispozici neskutečné množství technologií obklopující náš každodenní život. Tento pokrok je čím dál více energeticky náročný, až se dostáváme do rozměrného problému, že naše současně nejvíce využívané zdroje energie z fosilních paliv, jako jsou uhlí, ropa či zemní plyn nebo i jaderná paliva jako uran, nebo plutonium jsou nevyhnutelně vyčerpatelné a neobnovitelné, alespoň z hlediska vnímání času z lidské perspektivy.

Otázkou současnosti tedy je zefektivňování procesu transformace i distribuce energie, vhodné využívání velkého množství odpadního tepla vznikajícího při práci tepelných strojů, v neposlední řadě i upřednostňování a využívání alternativních zdrojů energie. S tím souvisí i ekologická stránka věci, moderní technologie využívající energie šetrné k životnímu prostředí tak, aby následky technického pokroku nebyly fatální pro život na Zemi. Naproti konvenčně využívaným tepelným strojům by měly být prosazovány různé alternativy a v těchto oblastech přichází na scénu termoakustická zařízení. Z fyzikální podstaty je termoakustický jev závislý na určitých parametrech, po jejichž splnění může být děj využíván v konstrukčně relativně jednoduchých zařízeních, bez nutných vnitřních mechanismů a komplikovaných prvků. V tom je hlavní potenciál termoakustiky.

Cílem této bakalářské práce je návrh modelu experimentálního termoakustického chladicího zařízení a jeho následná fyzická realizace, jež bude sloužit dalšímu zkoumání. Vybral jsem si toto téma, protože již na střední škole jsem se zajímal o Stirlingův motor, jehož princip částečně souvisí s termoakustickým jevem a v dřívějších letech jsem si doma vytvořil několik funkčních modelů Stirlingova motoru (viz *Obrázek 1.1*). Samotný návrh termoakustického chladicího zařízení vychází ze studia odborné literatury, z vlastních poznatků z této problematiky a z předchozích zkušeností s podobnými zařízeními na katedře energetických zařízení na TUL.



Obrázek 1.1: Vlastní model Stirlingova motoru

1.1 Úvod do termoakustiky

Jak již samotný název napovídá, termoakustika (TA) kombinuje termodynamiku s akustikou a popisuje interakci mezi teplem a zvukem. Termín poprvé použil v roce 1980 Rott Nikolaus ^[1]. Podle jeho obecného výkladu termoakustika zahrnuje „všechny akustické děje, při kterých hrají roli vedení tepla a změna entropie (plynného) média“

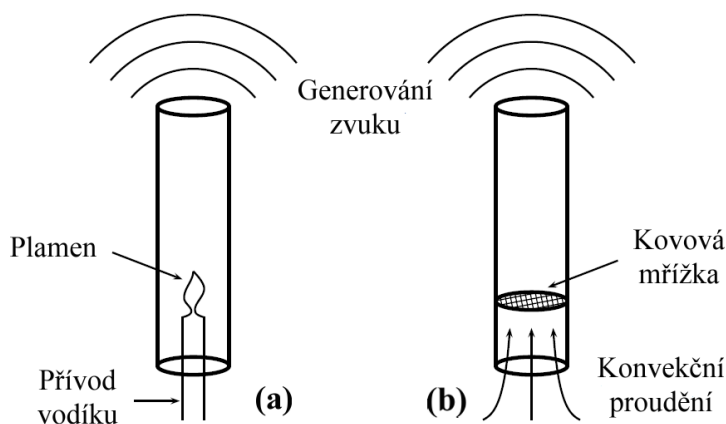
Většinou je na zvukovou vlnu v tekutině nahlíženo jako na kombinovaný účinek tlaku a rychlosti kmitání částic. Na druhé straně může jako odpověď na (izoentropické) kolísání tlaku docházet k teplotním oscilacím. Při šíření zvuku ve volném prostoru je kolísání teploty malé a částice vzduchu podléhají adiabatické expanzi a kompresi. Nicméně, necháme-li kapalinu vzájemně tepelně působit na rozhraní s pevnou látkou, nastane přenos tepla mezi plynem a pevnou látkou. Za těchto okolností může vznikat široké spektrum termoakustických účinků.

Bylo objeveno, že za určitých provozních podmínek může být tato termoakustická koncepce využita k vytvoření dvou základních typů: chladicí zařízení či tepelné čerpadlo, měnící zvuk na užitečné chlazení či topení a termoakustický stroj neboli motor, ve kterých je teplo přeměněno na akustickou (mechanickou) práci. Typicky jsou tyto přístroje vyrobeny z rovných, nebo smyčkových trubek s uvnitř vhodně umístěným porézním materiálem. Termoakustická zařízení by mohly být hojně využívána, protože pomocí nich lze vyrábět značné množství mechanické energie, nebo tepla s rozumnou účinností. Navíc, na rozdíl od konvenčních motorů a chladicích zařízení, mohou pracovat bez složitých vnitřních mechanismů, jako jsou vačky, kliky a písty atd. a obvykle nemají více než jeden mechanicky pohyblivý prvek. Vzhledem k této jejich vlastní jednoduchosti jsou velmi spolehlivé, vyžadují minimální, nebo žádnou údržbu a mohou být vyráběny při relativně nízkých nákladech. Kromě toho jsou šetrné k životnímu prostředí, protože používají netoxické plyny, neprodukují žádný nebezpečný odpad a jsou snadno přizpůsobitelné pro využití sluneční energie, nebo průmyslového odpadního tepla.

Navzdory všem těmto výhodám stále existují mnohé problémy a důvody, které musí být vyřešeny předtím, než termoakustická zařízení mohou být konkurenceschopná a použitelná ve velkém měřítku. Problémy jsou například v důsledku oscilačního charakteru proudění v interakci s pevnými hranami a tím vzniklé různé druhy složitých profilů průtoku, jako víry, turbulence či asymetrický tok. Navíc, termoakustická zařízení často pracují při vysokých tlakových amplitudách, což může vést k různým nelineárním účinkům, jako jsou například rázové vlny. Kromě toho přenos tepla mezi plynem a sousedící stěnou pevné látky není zdaleka ideální a v systému roste entropie. V současnosti probíhá intenzivní výzkum v oblasti zvyšování účinnosti termoakustických zařízení. ^[2]

1.2 Historie a využití termoakustiky

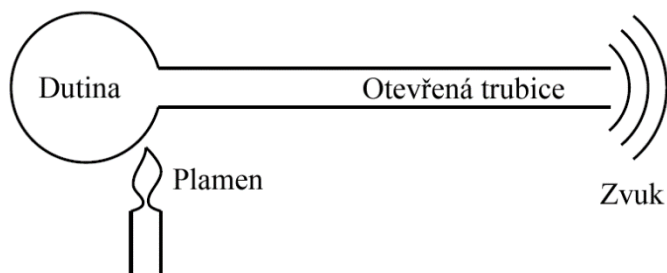
Vznik akustických vln při působení tepla je pozorován a studován již více než dvě století. Poprvé se tímto fenoménem začal zabývat Byron Higgins ^[3] v roce 1777, kdy ve skleněné trubici zapálil vodíkový plamen. V určité poloze plamene vznikl zvuk. Tento experiment je známý jako Higginsův „zpívající plamen“, (viz *Obrázek 1.2(a)*). Podobný, avšak známější model vytvořil Petrus L. Rijke v roce 1859 ^[4] (viz *Obrázek 1.2(b)*). Usiloval o vytvoření hudebního nástroje z varhanní píšťaly a plamen nahradil žhavenou kovovou mřížkou. Zjistil, že zvuk je silnější, je-li mřížka umístěna ve spodní polovině, nejsilnější pak přesně v $1/4$ délky píšťaly a zvuk je generován, pouze když může píšťalou volně proudit



Obrázek 1.2: (a) Higginsův „zpívající plamen“, (b) Rijkova trubice ^[2]

vzduch.

V roce 1850 C. Sondhauss ^[5] provedl výzkum který je považován jako zásadní pro pohled dnešního chápání termoakustických oscilací. Studie byla založena na jevu, který pozorovali již staří skláři. Při vyfukování skleněných dutin nad plamenem pomocí dlouhé chladné sklářské píšťaly o průměru několika milimetrů jsou spontánně produkovány čisté tóny, chybělo však teoretické vysvětlení. Na *obrázku 1.3* je znázorněna „Sondhaussova trubice“ jež je na jednom konci otevřená a na druhém je ohřívána dutina. O více než století později, v roce 1962 R. L. Carter experimentálně učinil velký objev v historii termoakustiky a to, že přidáním tenkých skleněných trubiček do Sondhaussovy trubice se zvýší zvukový výkon, a přemýšlel tak o využitelnosti zařízení pro výrobu elektřiny.^[6] Na základě Carterových poznatků provedl K. T. Feldman svou disertační práci a sestrojil termoakustický stroj generující 27 W akustického výkonu za dodání 600 W tepelného výkonu.

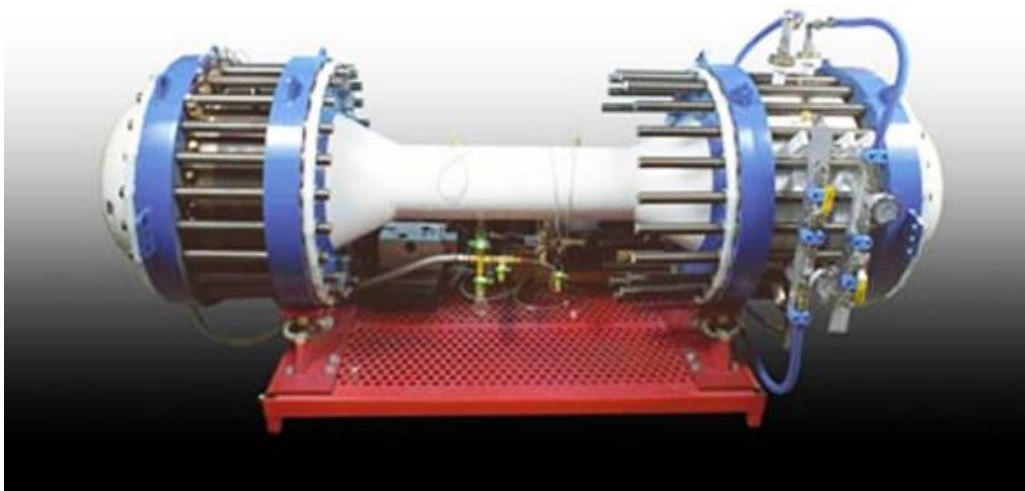


Obrázek 1.3: Sondhaussova trubice ^[2]

Teorií termoakustického jevu se poprvé začal zabývat G. R. Kirchhoff, který provedl v roce 1868 výpočty zvukových oscilací z tepelného zdroje. N. Rott a kolektiv představili správné rovnice popisující šíření tlaku a přenos energií v kanálku, který zahrnoval teplotní gradient a sinusové oscilace. Rottova teorie byla následně potvrzena při experimentech s pracovními plyny jako vzduch, helium a stlačené helium. Srovnání výsledků s teorií bylo velmi přesné.

Přenos tepla za pomoci zvuku je mnohem novější v porovnání s produkcí zvuku za pomoci tepla. Gifford a Longworth vyrobili funkční chladicí zařízení využívající nízkofrekvenčního vlnění o vysoké amplitudě. Svůj vynález pojmenovali „trubkový pulzní chladič“. V 80 letech 20. století Swift a kolektiv provedli v Los Alamos Laboratory v USA mnoho studií na termoakustických chladičích. V tehdejší době byli lidé přitahováni touto moderní technologií. Mnohá termoakustická zařízení vznikla zejména na Penn State University, Los Alamos National Laboratory a na Naval Postgraduate School (NPS) v Kalifornii. Termoakustický chladič „STAR“ vyvinutý na NPS dokázal na stacku vytvářet teplotní rozdíl až 80°C při výkonu pouhých 4 W. Toto zařízení bylo namontováno v roce 1992 do raketoplánu Discovery. Další chladič tohoto typu byl montován v roce 1995 pro chlazení obvodů radarů pro americké námořnictvo. Systém pracoval se směsí helia a argonu pod tlakem 2 MPa a generoval 419 W chladicího výkonu, při dodání 216 W akustického výkonu. Chladič pracoval se 17 % účinností Carnotova cyklu při nejnižší teplotě 4 °C, nicméně při použití vhodnějších tepelných výměníků mohla být Carnotova účinnost až 26 %.^[7]

Po tomto úspěchu si americké námořnictvo objednalo termoakustické chladicí zařízení, které by dosahovalo výkonu 10 kW. Zařízený bylo navrhováno na Penn State University v letech 1996 - 1998 a dostalo název Triton (viz *Obrázek 1.4*). Po dokončení v roce 2005 dokázal Triton přeměnit tři tuny vody denně na led o teplotě 0 °C, pracoval se směsí helia s argonem pod tlakem 3 MPa a dosahoval chladicího výkonu 10 kW s účinností Carnotova cyklu 19 %.



Obrázek 1.4: Termoakustický chladič Triton využívaný americkým námořnictvem^[7]

Los Alamos National Laboratory se zabývalo především velkými průmyslovými aplikacemi, jedním z jejich chladicích projektů byl TADOPTR. Vyvinuté zařízení z roku 1989 používané ke zkapalňování zemního plynu pro svůj provoz spálí cca 30 - 40 % a zbylých 60-70 % zemního plynu se zkapalní. Tento systém je velice levný, bez mechanických pohyblivých částí. Při zkapalňování je dosahováno teplot až -160 °C.

Tijani, Zeegers a Waele upravili matematické rovnice popisující termoakustický jev a nabídli systematický přístup pro návrh skutečných zařízení, sami navrhli, zkonstruovali a provedli výkonová měření na vlastním chladicím zařízení. Použili helium jako pracovní plyn pod tlakem 1 MPa a dosáhli teploty -65 °C.

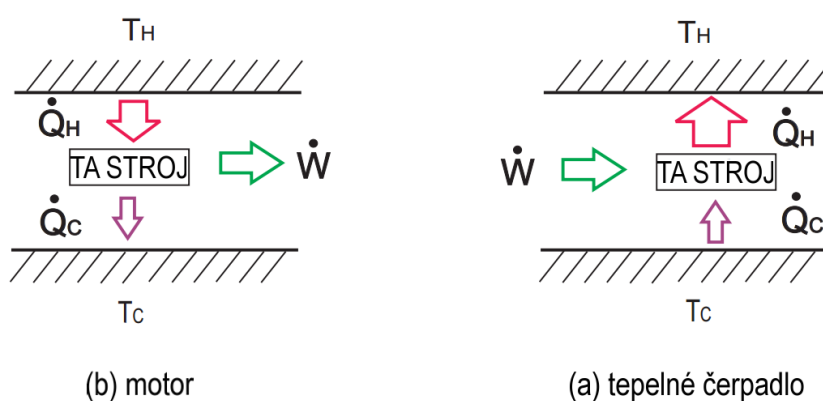
Qiu Li Min a kolektiv^[8] dosáhli teploty 80 K, tedy -193 °C, pomocí termoakustického chladiče s pracovním plynem heliem pod tlakem 2,08 MPa a výkonem pouhých několik set miliwattů. Jejich práce pokračuje s cílem dosáhnout teploty 40 K.^[7]

2. Teorie termoakustiky

Následující kapitola přesněji vysvětluje na jakých fyzikálních principech termoakustická zařízení pracují a naznačuje nám, jak tato zařízení vhodně využít. Je zde osvětlen mechanismus, který stojí za termoakustickou přeměnou energie zvuku na energii tepelnou a naopak.

2.1 Termodynamika

Termoakustická zařízení jsou v podstatě tepelnými stroji, které jsou charakterizovány tepelným tokem a tokem práce, jak je znázorněno na *obrázku 2.1*. V TA motoru je vnitřní energie média přeměňována na akustickou práci, tepelný tok je ve směru od tepelného zdroje o teplotě T_H do chladiče o teplotě T_C a stroj generuje akustickou práci. V tepelném čerpadle je akustická práce absorbována zařízením a teplo je čerpáno z nízké teploty T_C na teplotu T_H .



Obrázek 2.1: Tok tepla a práce v TA systémech (a) motoru a (b) tepelného čerpadla^[10]

Energetický tok v termodynamickém systému je řízen prvním a druhým zákonem termodynamiky. První zákon se týká zachování energie a popisuje změny toku vnitřní energie systému \dot{U} . Protože se jedná o ustálený stav je $\dot{U} = 0$, platí tedy rovnice

$$\dot{U} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_C - \dot{W} = 0. \quad (2.1)$$

Druhý zákon termodynamiky říká, že kterýkoli probíhající reálný děj způsobí zvýšení celkové entropie systému S . Druhý zákon lze formulovat jako

$$\dot{S} = \frac{\dot{Q}_H}{T_H} - \frac{\dot{Q}_C}{T_C} + \dot{S}_1. \quad (2.2)$$

Nevratná produkce entropie v systému $\dot{S}_1 \geq 0$. Jedná se o ustálený stav, tedy $\dot{S} = 0$ a můžeme psát

$$\frac{\dot{Q}_C}{T_C} \geq \frac{\dot{Q}_H}{T_H} \text{ pro režim motor a} \quad (2.3)$$

$$\frac{\dot{Q}_C}{T_C} \leq \frac{\dot{Q}_H}{T_H} \text{ pro tepelné čerpadlo.} \quad (2.4)$$

Rovnosti může být dosaženo pouze v ideálním případě, kdy neprobíhají žádné nevratné děje.

2.2 Chladicí faktor

V případě chladicího zařízení jsou zásadními hodnotami množství tepla Q_C odebrané při nízké teplotě a velikost práce W využitá k odebrání tohoto tepla. Chladicí faktor je definován, jako poměr těchto hodnot, tedy

$$\varepsilon_{ch} = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{W}}. \quad (2.5)$$

Z hlediska termodynamiky je chladicí zařízení tepelný stroj pracující mezi dvěma zdroji tepla (viz *Obrázek 2.1*), jedním o vyšší teplotě T_H a druhým o nižší teplotě T_C . Využitím prvního zákona termodynamiky (2.1) dostává rovnice (2.5) podobu

$$\varepsilon_{ch} = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{Q}_H - \dot{Q}_C}, \quad (2.6)$$

kde práce W je za předpokladu, že neexistuje hmotnostní tok do (ze) systému, vyjádřena v souladu s prvním zákonem termodynamiky jako rozdíl tepla dodaného při teplotě T_H a tepla odevzdaného při teplotě T_C . Za předpokladu, že chladicí zařízení pracuje ideálně, nedochází k produkci entropie vlivem nevratnosti kteréhokoli z dějů v pracovním cyklu a v souladu s druhým zákonem termodynamiky lze definovat tzv. Carnotův chladicí faktor

$$\varepsilon_{ch} = \frac{T_C}{T_H - T_C}, \quad (2.7)$$

což je chladicí faktor ideálního chladicího zařízení, a je vždy větší než chladicí faktor reálného zařízení pracujícího mezi zdroji tepla o teplotách T_C a T_H ^[11].

2.3 Zvukové vlny a tlak

Zvuk obecně můžeme definovat jako podélné mechanické kmitání, které je charakterizováno parametry pohybu částic pružného prostředí. Vlivem vzruchu, který je generován zdrojem zvuku se částice plynu v některých místech prostoru navzájem přibližují či vzdalují, tím vzniká jejich zhuštění nebo zředění (přetlak a podtlak). Zvukové vlny jsou v podstatě tlakové vlny šířící se prostředím. Jedním ze způsobů, jak kontrolovat tyto rozdíly tlaku je vytvoření stojatého vlnění. Rychlost šíření těchto tlakových změn, tedy rychlost zvuku je v každém prostředí různá a je definována jako

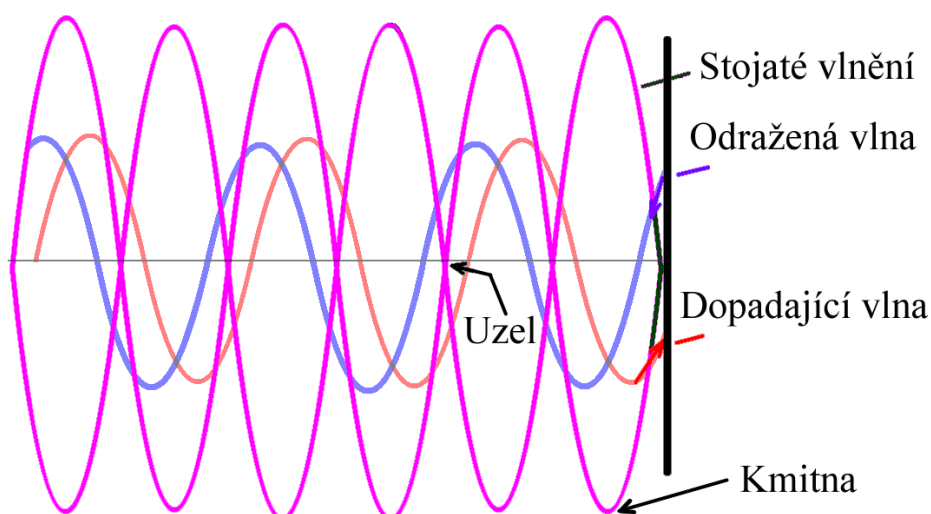
$$a = \sqrt{\frac{\kappa \cdot R \cdot T}{M}}, \quad (2.8)$$

kde κ je Poissonova konstanta, R molární plynová konstanta, T termodynamická teplota a M molární hmotnost.

2.4 Stojaté vlnění

Pokud se pružným prostředím šíří vlnění ze dvou či více zdrojů, jednotlivá vlnění se pohybují nezávisle. Pokud se však dvě nebo více vlnění setkají, nastane jejich skládání, tedy interference vlnění a kmitání bodu v uvažovaném místě je určeno superpozicí okamžitých výchylek jednotlivých vlnění. Tento princip platí pro všechny typy vlnění, jako třeba pro mechanické či elektromagnetické.

Po interferenci dvou stejných vlnění – přímého a odraženého, která postupují stejnou rychlostí, ale opačnými směry, vzniká stojaté vlnění. Stojaté vlnění se nepohybuje a poloha



Obrázek 2.2: Odraz vlnění na pevné překážce a vzniklé stojaté vlnění^[12]

maximální a nulové výchylky se v čase nemění. V prostoru tedy vzniknou body s nulovou výchylkou, tzv. uzly stojatého vlnění a body s maximální amplitudou nazývané kmitny stojatého vlnění.

Dopadá-li zvuková vlna na překážku, dojde k jejímu odrazu. Na vlastnostech překážky závisí průběh odražené vlny. U pevné překážky se vlna odrazí s opačnou fází (viz *Obrázek 2.2*). Jako příklad může být struna napnutá mezi dvěma body. U poddajné překážky se odrazí se stejnou fází. Platí to i například pro volný konec pověšeného lana, také otevřený konec trubice se chová jako poddajná překážka.

Amplituda akustického tlaku je vůči amplitudě pohybu elementární částice prostředí posunuta o $\frac{1}{4}$ vlnové délky λ . V místech pohybových uzlů se tedy nachází tlaková maxima a v místech pohybových kmiten je amplituda akustického tlaku nulová. ^[16]

Akustický tlak je definován jako rozdíl mezi okamžitým celkovým tlakem v daném místě a statickým tlakem, kdy se vlnění prostředím nešíří. Hladina akustického tlaku je

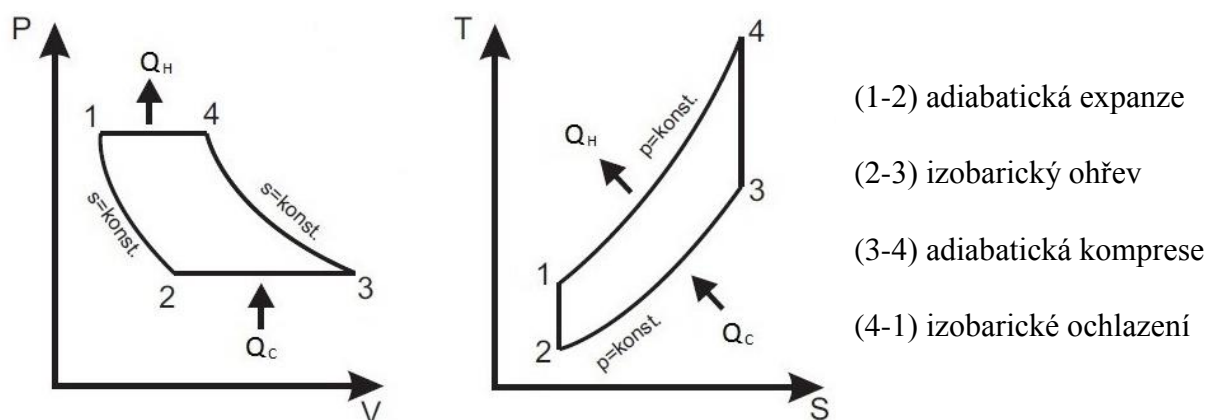
$$L_p = 20 \cdot \log \left(\frac{p_{ef}}{p_0} \right), \quad (2.9)$$

kde $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ je referenční akustický tlak, tedy nejnižší hodnota zvuku, kterou je průměrný člověk schopen zaznamenat. $p_{ef} = \frac{p_1}{\sqrt{2}}$ je efektivní hodnota akustického tlaku. Hladina akustického tlaku L_p se udává v logaritmických jednotkách decibelech dB .

2.5 Termoakustický jev ve stacku

V akustických vlnách se vyskytují teplotní výkyvy spojené s kolísáním tlaku. Tato skutečnost vytváří na povrchu pevných látek termoakustický jev. Tyto teplotní výkyvy se objevují neustále v našem okolí, ale na běžné hladině akustického tlaku v prostředí dosahují rozdílu cca $10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}$ a není možné je cítit. V termoakustických zařízeních je nejdůležitější součástí takzvaný stack, který je tvořen velkým množstvím kanálků ve směru šíření vlny, může být tvořen i na sebe naskládanými destičkami. Tyto kanálky zaručují, že relativně velké množství pracovního plynu bude v těsné blízkosti pevných stěn kanálků, aby nastalo fázové posunutí amplitudy akustického tlaku vůči amplitudě teploty. Elementární částice plynu tedy vykoná pracovní cyklus o 4 krocích, tzv. obrácený Ericson-Braytonův cyklus dle *obrázku 2.3*, který v případě „levotočivého“ oběhu (chlazení) vypadá následně: částice jsou postupně expandovány a vychýleny ze své původní polohy (1-2), ohřáty (2-3), komprimovány a vychýleny zpět (3-4) a ochlazeny (4-1). Účelem stacku je tedy poskytnout médium pro

akumulaci tepla zatímco zvuková vlna osciluje rezonátorem. Akustická práce absorbována nebo produkována částicí plynu odpovídá ploše $\oint_{(V)} p dV$ v diagramu p-V na *obrázku 2.3*.



Obrázek 2.3: Obrácený Ericson-Braytonův cyklus^[9]

Protože je tepelný kontakt mezi plynem a stěnou kanálků stacku nedokonalý, je vhodné definovat tepelnou penetrační hloubku δ_k a viskózní mezní vrstvu δ_v . Vzdálenost od stěny odpovídající tepelné penetrační hloubce je zhruba ta, při které je fázové posunutí mezi amplitudami teploty a tlaku nejvýraznější.

Tepelná penetrační hloubka δ_k je tloušťka vrstvy tekutiny, kterou může teplo proniknout za polovinu oscilačního cyklu. Jelikož částice tekutiny v rezonátoru neustále oscilují, lze tepelnou penetrační hloubku považovat za konstantní. Platí

$$\delta_k = \sqrt{\frac{k_g}{\pi f \rho_m c_p}}, \quad (2.10)$$

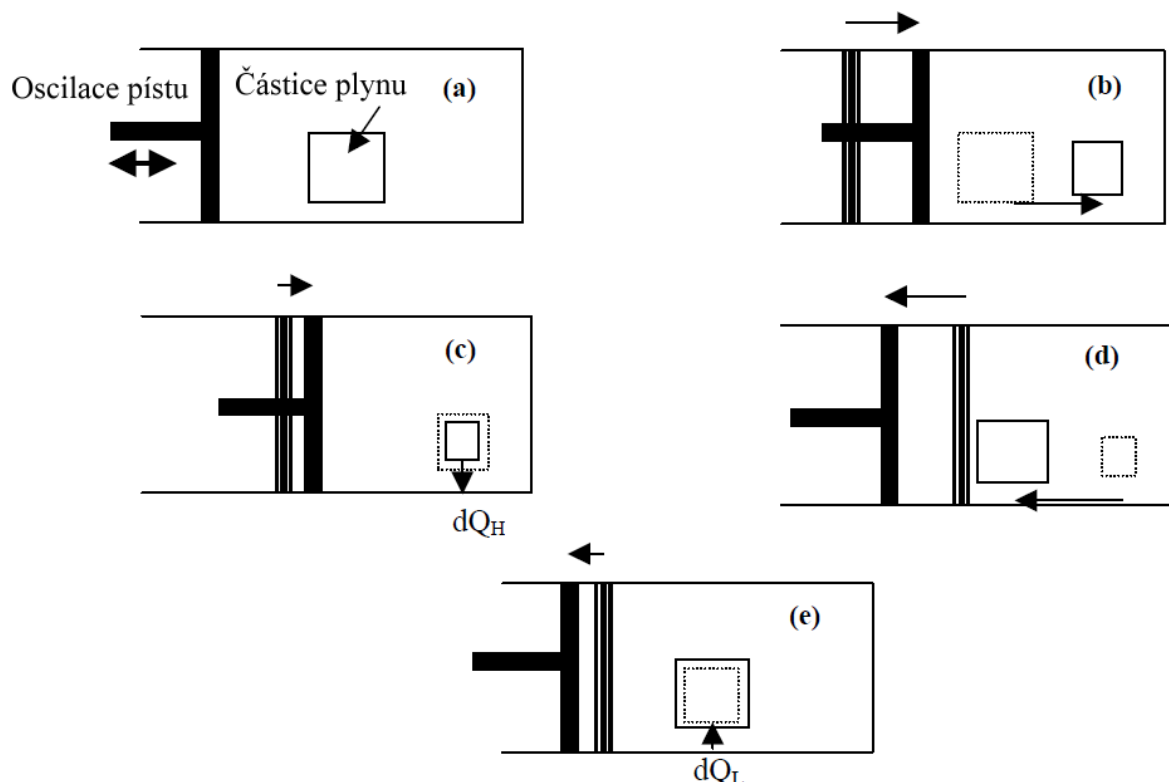
kde k_g je tepelná vodivost pracovního plynu, f frekvence oscilací, ρ_m střední hustota pracovního plynu a c_p izobarická měrná tepelná kapacita pracovního plynu. Dále definujeme tloušťku mezní vrstvy od stěny se značným vlivem viskozity, kde ν je kinematická viskozita,

$$\delta_v = \sqrt{\frac{\nu}{\pi f}}. \quad (2.11)$$

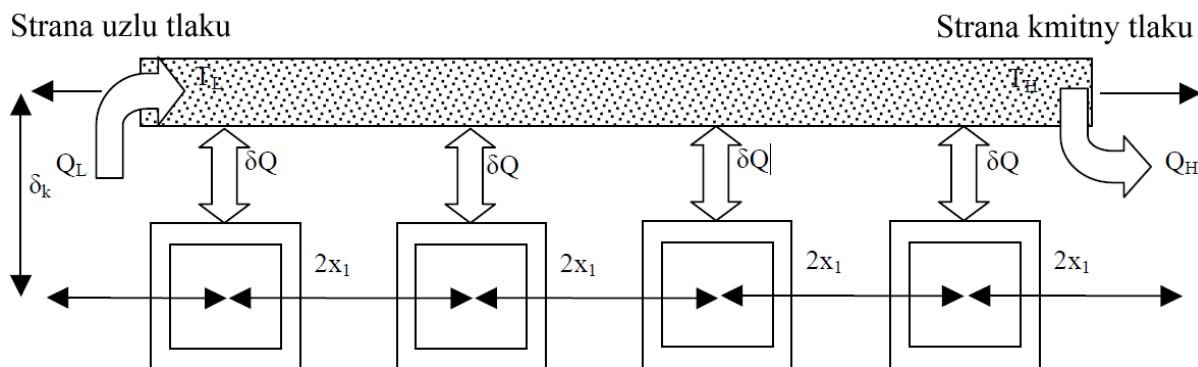
Chování elementárního objemu plynu v kanálcích stacku

Na *obrázku 2.4* jsou znázorněny děje, kterými prochází elementární objem plynu ve stacku. Akustická vlna je znázorněna na obrázku (a) oscilací pístu s konstantní frekvencí, kde je druhá strana válce uzavřena. Důsledkem tlakových změn se plyn ohřívá a ochlazuje. Při stavu

(b) je čtvercový objem plynu posunut vpravo a stlačen, čímž vzroste i jeho teplota. Ve stavu (c) se teplota uvažovaného plynu dále zvýší a teplo je předáno do pevné stěny stacku. Při následném pohybu pístu vlevo na obrázku (d) klesá tlak i teplota objemu plynu, který se přesune vlevo. Při nastalém stavu (e) je do chladnějšího objemu plynu dodáváno teplo z okolní stěny kanálku stacku. Všechny částice plynu v blízkosti stěny, tedy v penetrační hloubce, se chovají stejně a teplo je přenášeno zleva doprava. Výsledkem je vznik teplotního gradientu mezi levou a pravou stranou.^[7]

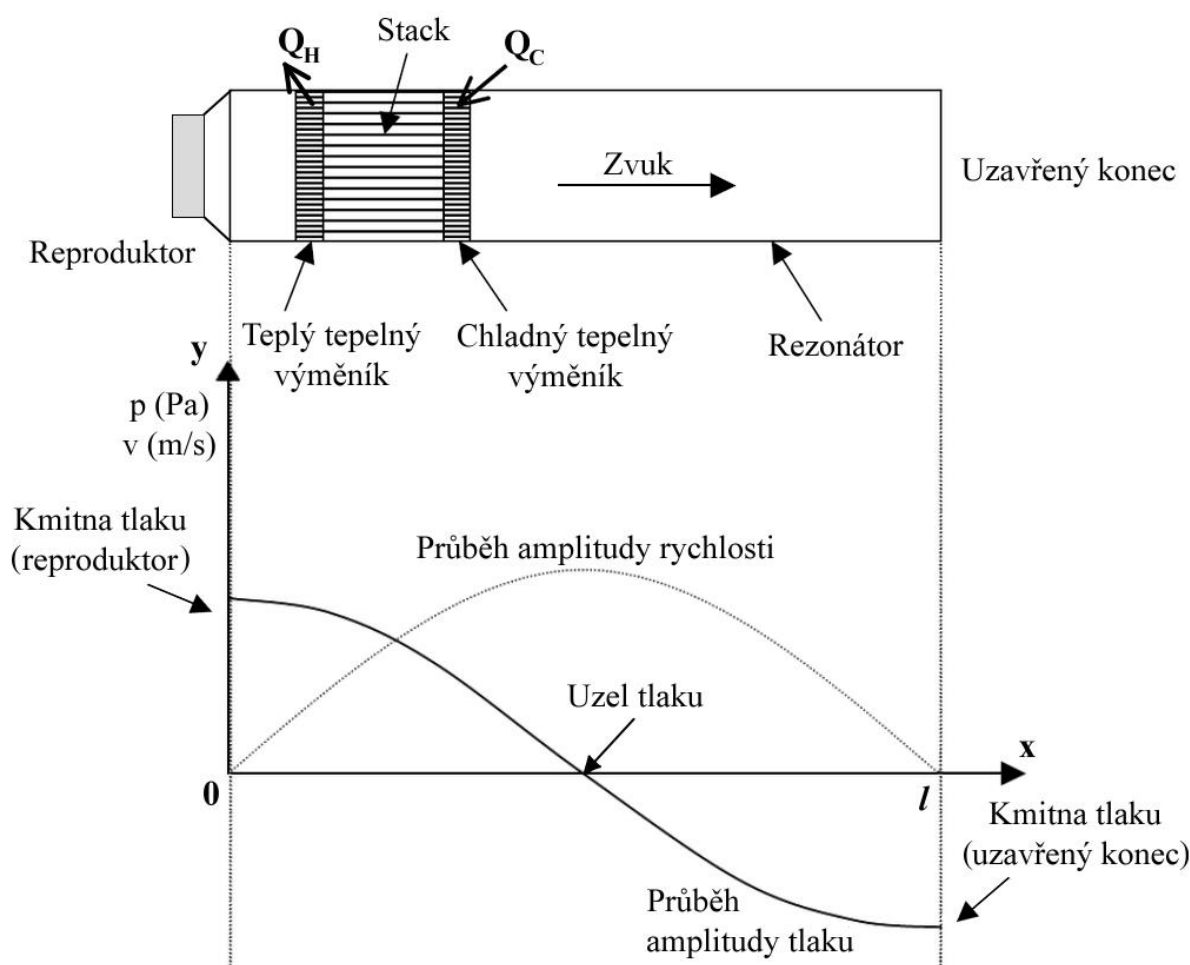


Obrázek 2.4: Chování elementárního objemu plynu ve stacku^[7]



Obrázek 2.5: Znázornění přenosu tepla v délce stacku na jedné destičce^[7]

Jak je zřejmé z *obrázku 2.5*, vychýlení částic je většinou menší než délka stacku a k přenosu tepla z jedné strany na druhou dochází pomocí dočasného uložení tepla z jedné částice do materiálu stacku a následným předáním tepla druhé chladnější částici. Tohoto procesu se zúčastní pouze částice ve vrstvě penetrační hloubky δ_k , mimo tuto oblast dochází jen k vratné adiabatické expanzi a kompresi. Tyto částice přenášejí svými výkmity teplo ve směru nejbližší kmitny tlaku, což znamená, že se stack na straně kmitny tlaku zahřívá a na straně uzlu ochlazuje. Umístěním vhodných tepelných výměníků těsně na stack z obou stran bude zaručen ustálený tepelný tok. Na *obrázku 2.6* je znázorněn průběh amplitud rychlosti a tlaku v půlvlnovém termoakustickém chladicím zařízení.^[7]



Obrázek 2.6: Průběh rychlosti a tlaku v půlvlnovém TA chladicím zařízení^[7]

3. Základní komponenty

V následující kapitole jsou popsány základní komponenty nezbytné pro fungování termoakustického chladicího zařízení.

3.1 Akustický zdroj

Pro efektivní fungování termoakustického chladicího zařízení je nezbytné zvolit vhodný mechanický oscilátor, který bude do systému dodávat akustickou, tedy mechanickou práci. Takovým mechanickým oscilátorem může být mnoho zařízení různých konstrukcí a mechanismů, založených na rozdílných fyzikálních principech. Pro tuto variabilitu se může termoakustické zařízení uplatnit v mnoha oblastech využití.

Pro účely termoakustického chladicího zařízení je potřeba mít harmonický mechanický oscilátor, který se vyznačuje periodickým opakováním určitých parametrů, jako je rychlost, zrychlení či poloha. Při vykonávání kmitů se přeměňují určité formy energie v jiné a naopak.

Stejně jako mnoho používaných zařízení pro přeměnu energií i termoakustické chladicí zařízení bude přeměňovat energii za pomoci fyzikálních jevů. Pro nás je však zásadní dodat mechanickou energii tuhé membráně, která bude kmitání předávat plynu, a tím se ve vhodně navrženém rezonátoru vytvoří nezbytné stojaté vlnění.

Piezokeramika

Podstatou funkčnosti je piezoelektrický jev, tedy schopnost krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformování. Existuje také nepřímý piezoelektrický jev, kdy se krystal ve vnějším elektrickém poli deformuje. Podmínkou jsou krystaly bez středu symetrie. Deformací se ionty opačných nábojů posunou v krystalové mřížce tak, že elektrická těžiště záporných a kladných iontů, která se v nezdeformovaném krystalu nacházejí ve stejném bodě, se od sebe vzdálí. Na určitých plochách krystalu se objeví elektrický náboj. Při nepřímém piezoelektrickém jevu je tomu naopak.

Piezokeramika se používá k převádění mechanických parametrů, jako je tlak nebo zrychlení, na parametry elektrické, nebo obráceně, tedy k převádění elektrických signálů na mechanický pohyb, případně vibrace. Piezokeramické materiály jsou kategorizovány jako funkční keramika. V čidlech umožňují převádět síly, tlaky a zrychlení na elektrické signály a ve zvukových a ultrazvukových převodnících a ovladačích přeměňují elektrická napětí na vibrace nebo deformace. Piezokeramické materiály se dělí jednak podle svého chemického složení

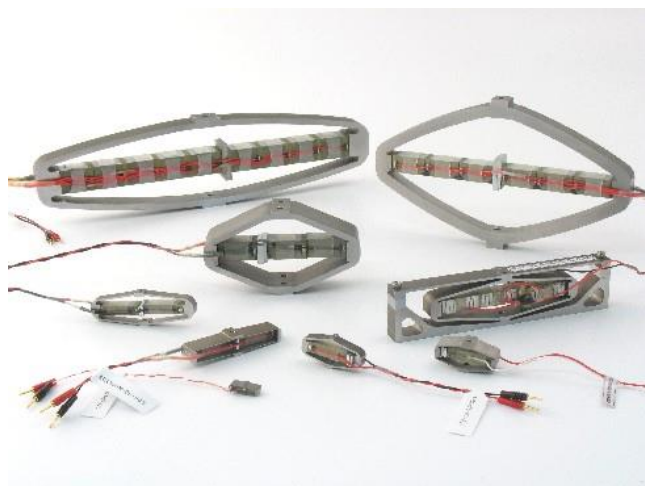
a jednak podle specifických aplikačních podmínek. Základními složkami piezokeramiky jsou oxidové materiály, zejména oxid olovnatý, oxid titaničitý a oxid zirkoničitý.

Piezokeramika má široké spektrum využití, například v automobilovém průmyslu při přesném řízení vstřikovacích procesů motoru, dále při použití v různých čidlech či snímačích. Sonar vyvinutý za první světové války byl jednou z prvních piezoaplikací pro detekci podvodních objektů. Ve zdravotnictví se využívá při čištění zubů od plaku, nebo litotripsii k odstraňování ledvinových a žlučnickových kamenů. Průmyslově se využívá při ultrazvukovém čištění a svařování. Další běžné aplikace jsou například plynové pieoelektrické zapalovače, snímače hudebních nástrojů, mikrofony, nebo reproduktory.

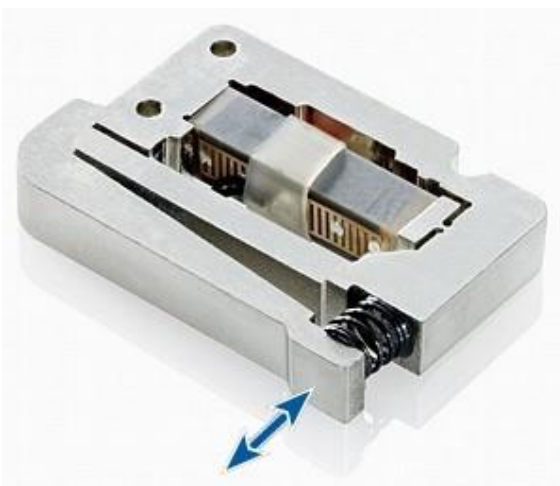


Obrázek 3.1: Různé piezokeramické komponenty^[13]

Použití piezokeramiky v termoakustice může být velmi výhodné jak pro generování zvuku, tak pro přímé získávání elektrické energie z akustické. Běžně se tato tělíska vyrábí v široké paletě rozměrů a tvarů (viz *Obrázek 3.1*). Většinou jsou však menších rozměrů s malým výkonem, ale relativně vysokou účinností. S jejich rozměrem také souvisí jejich vlastní rezonanční kmitočet v řádech kilohertzů až megahertzů. Při použití těchto tělísek v okolí jejich vlastního rezonančního kmitočtu, kdy mají nejvyšší výkon, by musel rezonátor termoakustického zařízení dosahovat délky jen několika milimetrů až centimetrů a bylo by takřka nemožné komponenty zařízení vyrobit za použití běžných technologií. Řešením problému malého výkonu a vysokých frekvencí může být seskupování jednotlivých tělísek do celků, které se vloží do tuhé konstrukce s mechanismem, jenž by přenášel pohyb na membránu s dostatečným výkitem (viz *Obrázky 3.2 a 3.3*)



Obrázek 3.2: Varianty piezokeramických^[17]

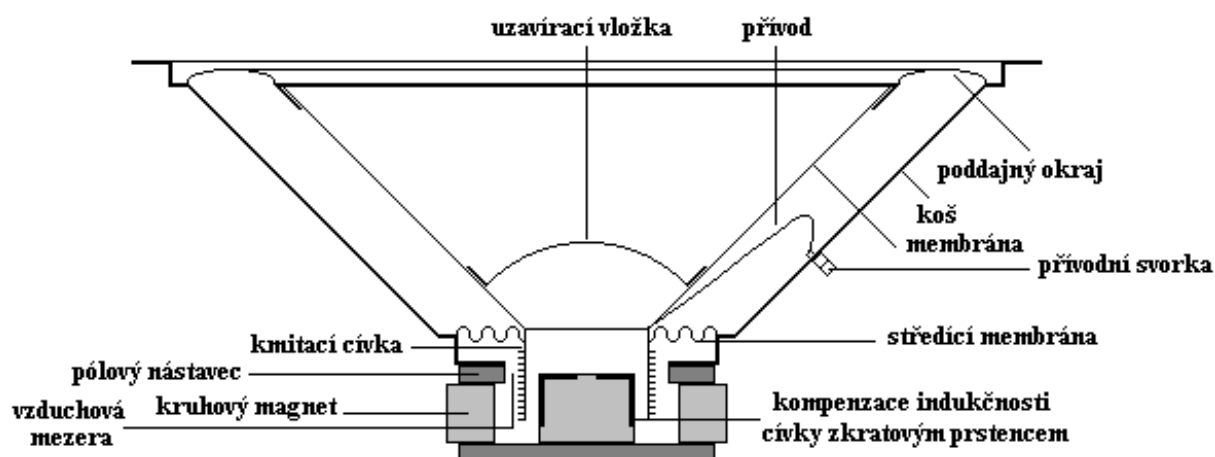


Obrázek 3.3: Piezokeramický pohon^[18]

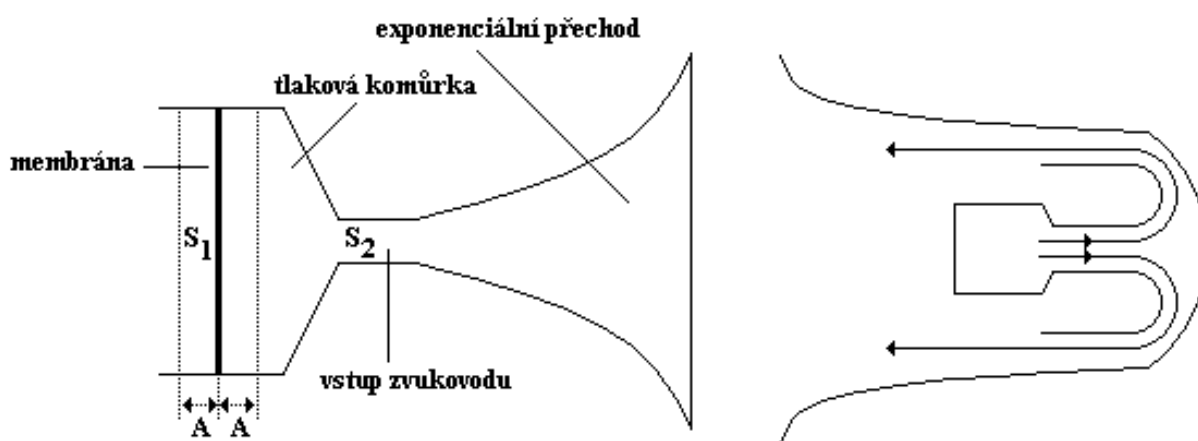
Bohužel po konzultaci s lidmi se zkušenostmi s piezoelektrickými systémy jsme došli k závěru, že by bylo velmi komplikované pro naše účely navrhnout vhodný systém, který by generoval kýžený akustický výkon, ale pro budoucí aplikace je piezokeramika jednoznačně neopomenutelná.

Elektrodynamický reproduktor

Elektrodynamické reproduktory jsou elektroakustické měniče pracující na principu vzájemného působení sil magnetického pole permanentního magnetu s magnetickým polem cívky, kterou protéká střídavý proud. Síla je tím vyšší, čím je silnější magnetické pole, čím větší proud protéká vodičem cívky, čím delší je vodič, respektive čím více závitů má cívka v magnetickém poli. Membrána kmitá společně s cívkou pohybující se v magnetickém poli v závislosti na přívodu střídavého proudu. Membrána vyzařuje do okolního plynu akustický výkon. Elektrodynamické reproduktory dělíme především na přímovyzařující a nepřímovyzařující – tlakové. Přímovyzařující reproduktory (viz *Obrázek 3.4*) produkují zvuk pomocí membrány do širokého okolí. Mají nízkou účinnost v rozmezí 1 - 5 %. Naproti tomu existují reproduktory tlakové (viz *Obrázek 3.5*), kdy je zvuk z membrány veden zvukovodem a až následně do volného prostoru. Jelikož je průřez zvukovodu menší než plocha membrány, při výchylce musí vytlačený objem vzduchu projít zvukovodem a nastává zvýšení rychlosti, zachovává se objemový tok – platí rovnice kontinuity. Protože akustický výkon je úměrný akustické rychlosti, při zachování stejného příkonu je možné dosáhnout účinnosti tlakových reproduktorů i přes 20 %.



Obrázek 3.4: Popis elektrodynamického přímovyzářujícího reproduktoru (řez)^[19]



Obrázek 3.5: Popis elektrodynamického tlakového reproduktoru (řez)^[20]

Elektrodynamické reproduktory se využívají k reprodukci zvuku především v člověku slyšitelném frekvenčním rozsahu 16 – 20 000 Hz. Existuje velmi široká paleta vyráběných reproduktorů pro všemožná zařízení, což vedlo k rozhodnutí, že elektrodynamický reproduktor vhodných parametrů bude nejvýhodnější variantou pro naše termoakustické chladicí zařízení. Pro zvýšení účinnosti je výhodné použít přímovyzářující reproduktor s přiléhajícím zvukovodem se zmenšujícím se průřezem, a tak je možné navrhnout navazující komponenty jako profil rezonátoru, stack a tepelné výměníky menších rozměrů, což zmenší ztráty celého zařízení a zvýší účinnost.

Termoakustický motor

Zdrojem zvuku může být také termoakustický motor, výsledné zařízení obsahuje tedy dva stacky a čtyři tepelné výměníky. Na jedné straně rezonátoru je z tepelného zdroje produkována akustická práce, která na druhé straně pohání termoakustické tepelné čerpadlo, případně chladič.

3.2 Rezonátor

Pro udržení v systému stojatého vlnění o určité frekvenci jsou zásadní geometrické tvary a rozměry rezonanční trubice, neboli rezonátoru, závislé na vlastnostech použitého pracovního média. Ve své podstatě je rezonátor trubka použitelná ve dvou základních konfiguracích. První možností je z poloviny uzavřený rezonátor, jehož frekvence f při, které vzniká stojaté vlnění, je dána vztahem

$$f = \frac{a}{4l}, \quad (3.1)$$

takový rezonátor nazýváme čtvrtvlnovým, neboť jeho délka odpovídá jedné čtvrtině délky zvukové vlny ($\lambda/4$). Druhou možností je rezonátor zcela uzavřený, tedy půlvlnový ($\lambda/2$), jehož frekvence je

$$f = \frac{a}{2l}, \quad (3.2)$$

kde l je délka rezonátoru a a rychlost zvuku v daném prostředí.

Mimo tyto základní konfigurace mohou být termoakustická zařízení tvořena různě zahnutým, případně i smyčkovým systémem potrubí a rezonátoru, zde již výpočet rezonanční frekvence není tak jednoznačný.

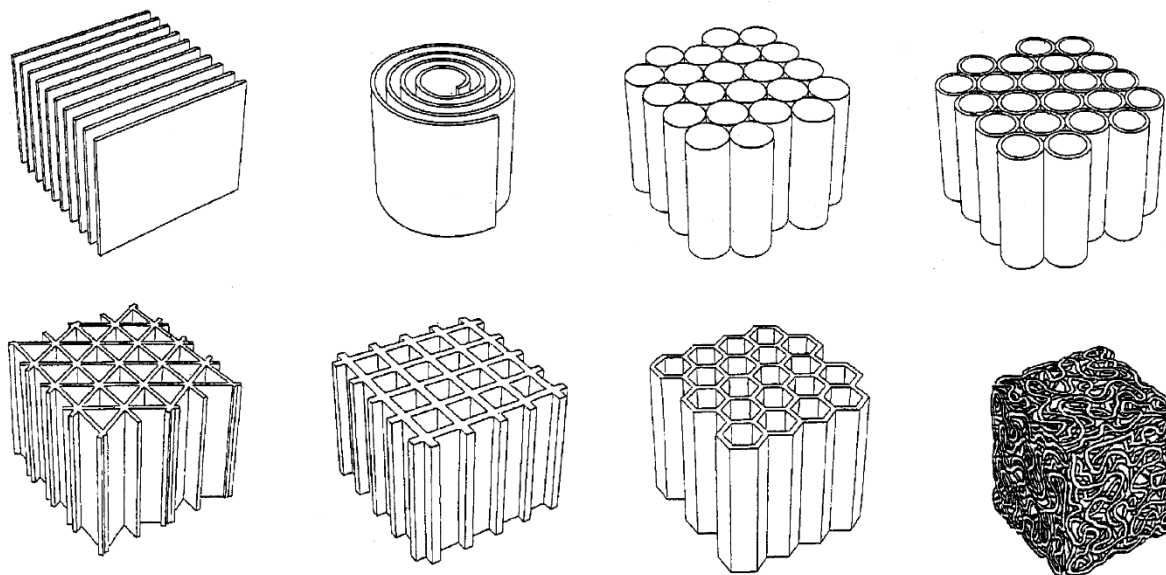
Rezonátor by měl být navržen tak, aby délka, tvar, hmotnost a ztráty byly optimální. Délka a tvar jsou určeny frekvencí a ztráty, jak tepelné, tak akustické, se odehrávají na mezní vrstvě o hloubce vrstvy δ_v podél stěny rezonátoru. Z tohoto důvodu je vhodné použití kruhového průřezu, čímž se minimalizuje povrch stěny. Dále jsou ztráty určeny délkou rezonátoru, tedy čtvrtvlnový bude mít zhruba poloviční povrch stěny a tedy i poloviční ztráty.

3.3 Stack

Stack, může být přeložen jako zásobník. Jak již bylo zmíněno, je nejdůležitější částí termoakustických zařízení a zprostředkovává přenos tepla z nízké teploty na vyšší. Teplo je přenášeno směrem k nejbližší kmitně tlaku. Výsledný chladicí výkon je závislý na součinu amplitudy tlaku a amplitudy rychlosti, z toho vyplývá, že v uzlových bodech amplitud nemůže být generováno chlazení a stack by měl být umístěn mezi kmitnami tlaku a rychlosti.

Stack by měl mít vysokou měrnou tepelnou kapacitu c a nízkou tepelnou vodivost λ_q v podélném směru. Podstatou je poskytnout co největší plochu s mezní vrstvou plynu, kde bude

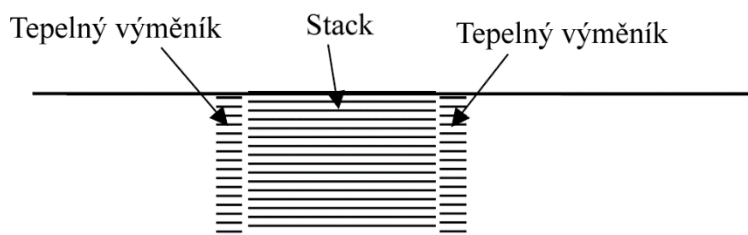
docházet k výměně tepla mezi plynem a materiálem stacku. Literatura se zmiňuje o mnoha konstrukčních provedení stacku, na *obrázku 3.6* jsou ukázány některé z možností od paralelních destiček až po složitější uspořádání. Jako vhodné materiály stacku mohou být různé polymery, keramické materiály, sklo nebo i kovy. Pro dosažení maximálního chladicího výkonu se zdá být nejvýhodnější keramický materiál Celcor® a také nerezová ocel.



Obrázek 3.2: Konstrukční varianty stacku^[15]

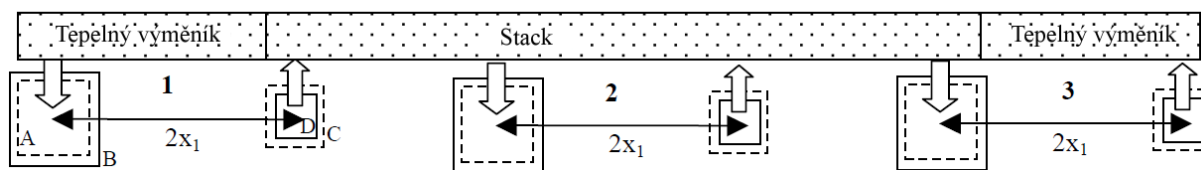
3.4 Tepelné výměníky

Tepelné výměníky, které jsou umístěné po stranách stacku (viz *obrázek 3.7*), zprostředkovávají při termoakustickém jevu přenos tepla s okolím, tedy s chlazeným místem a



Obrázek 3.3: Umístění tepelných výměníků vůči stacku^[7]

na druhé straně s chladičem. Měly by být z materiálu s nejvyšší možnou tepelnou vodivostí, jako nejvhodnější se zdá být měď. Tepelné výměníky jsou největším problémem termoakustiky. Je nutné, aby těsně navazovaly na profil stacku a neomezovaly oscilace plynu



Obrázek 3.4: Přenos tepla plynem mezi stackem a tepelnými výměníky^[7]

a zároveň by měly efektivně vést teplo z celého průřezu. Přenos tepla oscilujícími částicemi plynu mezi stackem a výměníky je patrný na *obrázku 3.8*, kde jsou schematicky znázorněny tři částice plynu. Částice 1 přenáší teplo z levého tepelného výměníku do stacku, částice ve středu přenáší teplo stackem a nakonec částice 3 předává teplo ze stacku do pravého výměníku. Kde x_1 je amplituda vychýlení částice plynu.

3.5 Plynné médium

Teplo přenášené stackem je úměrné součinu $p_m \cdot a \cdot A$, kde p_m je střední tlak plynu, a rychlost zvuku v plynu a A je plocha průřezu stacku. Také chladicí výkon je úměrný tlaku p_m . Vezme-li v úvahu vztah (2.10) pro penetrační hloubku δ_k , je zřejmé, že zvýšením tlaku vzroste hustota a tím se zmenší penetrační hloubka, čímž vznikne konstrukční problém s výrobou stacku a přilehlých tepelných výměníků s malými rozměry kanálků.

Chladicí výkon je také závislý na rychlosti zvuku v plynu a , platí tedy čím vyšší rychlost, tím vyšší chladicí výkon. Plyny jako helium či vodík, mají tuto rychlost vysokou, dále má helium i velmi dobrou tepelnou vodivost, což způsobuje efektivní tepelnou výměnu mezi deskou stacku a plynem, proto se zdá být jako výhodným médiem pro TA zařízení. Penetrační hloubka také roste s tepelnou vodivostí, což způsobuje jednodušší výrobu stacku a výměníků.

Výhodné může být i využití vodíku, zde je ale problém s jeho hořlavostí a zvyšují se nároky na těsnost.

Dále můžou být využity směsi helia s některými těžšími plyny jako argon, nebo xenon, čímž se můžou upravovat určité vlastnosti a může být dále zvyšována účinnost celého zařízení.

4. Návrh

Samotný návrh experimentálního termoakustického chladicího zařízení byl rozdělen do několika stádií. V průběhu vypracovávání bakalářské práce se několikrát změnila požadavky na výslednou podobu experimentálního zařízení. Vhodně zvolená konstrukce se odvíjela od předpokládaných technologických a finančních možností. Zásadním okamžikem při návrhu termoakustického chladicího zařízení bylo dokončení diplomové práce Tomáše Tisovského^[11], který za pomoci simulačního programu DeltaEC navrhl několik teoretických konfigurací termoakustického chladicího zařízení, z nichž jedna byla vybrána jako nejvhodnější pro tuto studii. Celý návrh je prováděn v prostředí programu Autodesk Inventor 2016.

4.1 Termoakustika na TUL

Na katedře energetických zařízení (KEZ) Technické Univerzity v Liberci bylo v minulosti vytvořeno několik prací zaměřených na termoakustiku. Pro účely seznámení se s principy termoakustiky, pochopení zákonitostí tohoto jevu a ověření vlastních poznatků bylo na katedře vytvořeno několik funkčních zařízení. Všechna tato zařízení zatím pracovala v režimu motoru, vytvářela tedy akustické vlnění na základě tepelného zdroje (viz *obrázek 4.1*). Jakubem Kolouchem byla v roce 2012 vytvořena bakalářská práce na téma: „Návrh a konstrukce termoakustického zařízení“ na tomto zařízení (viz *obrázek 4.2*) Tomáš Tisovský o rok později pokračoval vytvořením bakalářské práce na téma: „Výkonové charakteristiky



Obrázek 4.1: Malý TA motor na KEZ

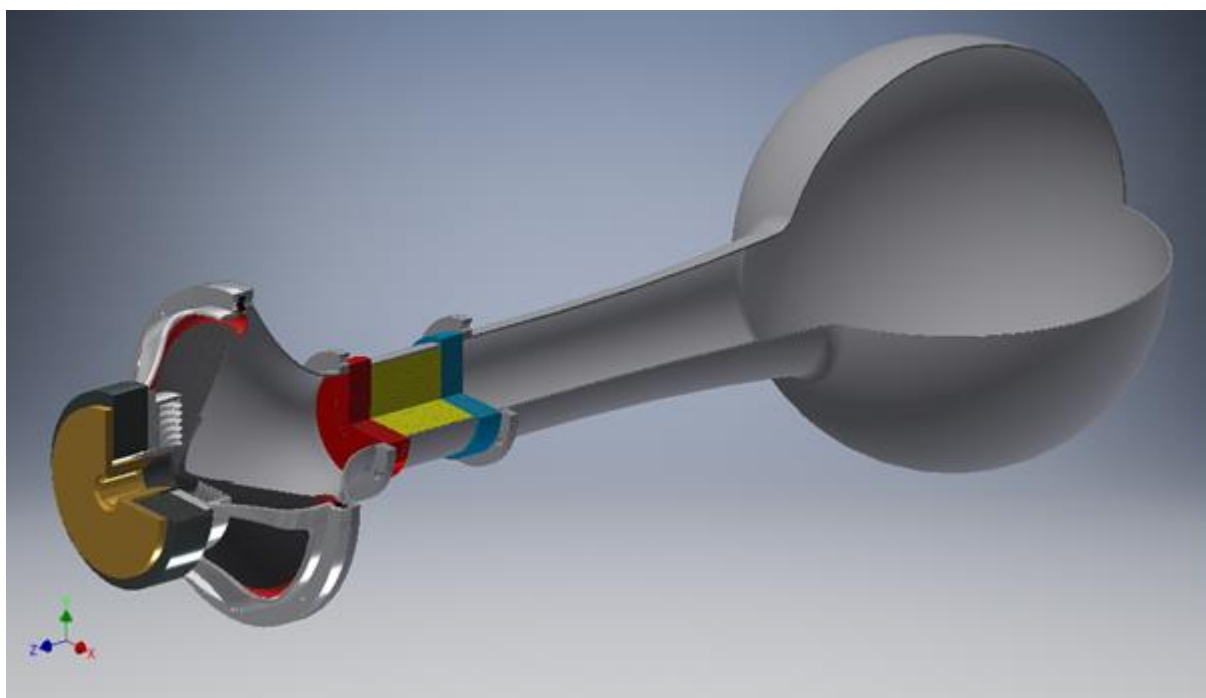


Obrázek 4.2: Velký TA motor na KEZ^[22]

termoakustického motoru“. Dále Martin Veselý vytvořil v roce 2013 diplomovou práci na téma: „Identifikace teplotního pole v termoakustickém generátoru“. Termoakustickým zařízením v režimu tepelného čerpadla, respektive chladiče se na KEZ poprvé zabýval Tomáš Tisovský ve své diplomové práci z roku 2015 na téma: „Analýza termoakustického chladicího zařízení“. Na jeho výsledcích je postavena tato bakalářská práce, která se zabývá návrhem modelu experimentálního termoakustického chladicího zařízení. V rámci česko-taiwanské spolupráce byl také publikován článek v Journal of Mechanics zabývající výzkumem termoakustického motoru ^[14] a v rámci dalších spoluprací Technické Univerzity v Liberci proběhlo několik konferencí na téma termoakustika.

4.2 Prvotní návrhy

V počátcích návrhu termoakustického chladicího zařízení bylo hlavní otázkou vhodný zdroj k dodávání mechanické práce do systému. Protože nebyly zpočátku nijak stanoveny parametry jako velikost, frekvence, teplotní rozsah či rozměry zařízení, v úvahu připadalo několik možností, od kterých by se odvíjel celý návrh.

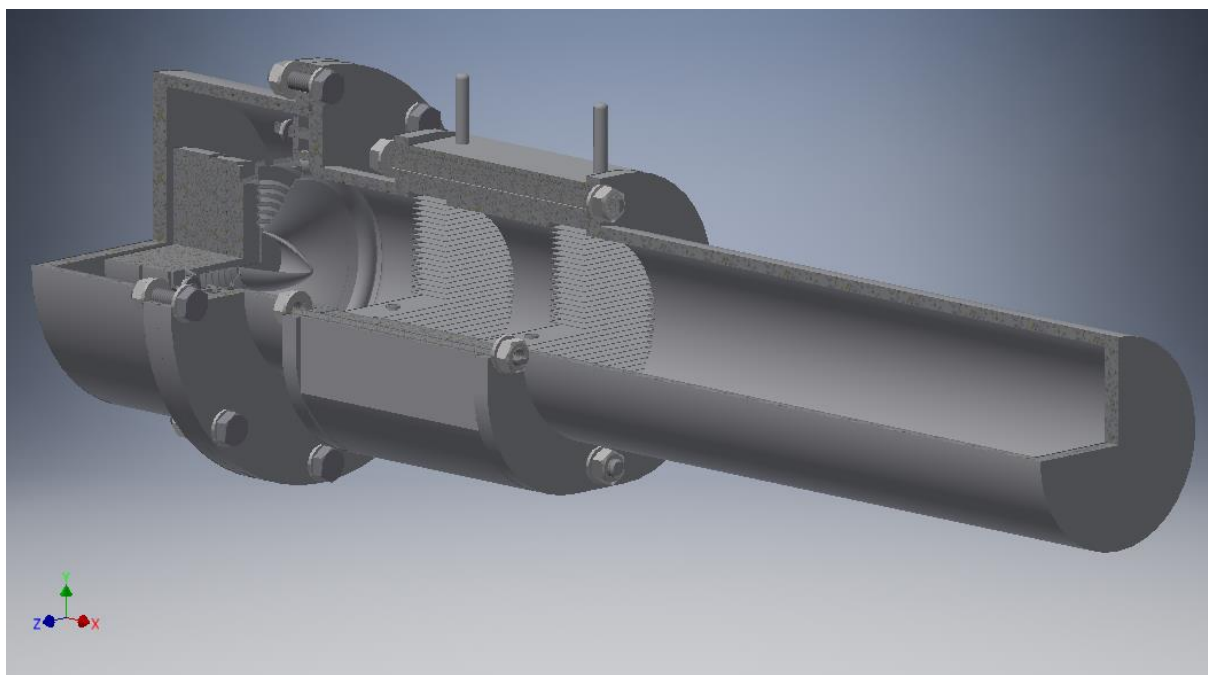


Obrázek 4.1: Návrh číslo 1

Návrh číslo 1 (viz *Obrázek 4.3*) vycházel ze čtvrtvlnového rezonátoru kruhového průřezu, s volným prostorem na konci, jež by byl simulován dutinou kulového tvaru. Zařízení by pracovalo s reproduktorem 12“ o výkonu 600 W a jako pracovní médium by byl vzduch o barometrickém tlaku. Hlavním konstrukčním materiálem by byl ocelový plech, jež by se musel tvářet a svářet do požadovaného tvaru. Bylo by však náročné nechat vyrobit rezonátor

tohoto tvaru, stejně tak by bylo složité vyrobit i plynulý přechod z reproduktoru na rezonátor. Materiály, ze kterých by byl vyroben stack a tepelné výměníky nebyl ještě vybrán.

Toto řešení bylo zavrženo a byl vytvořen návrh číslo 2 (viz *Obrázek 4.4*). Hlavním důvodem tohoto rozhodnutí byla potřeba zvýšení tlaku v systému pro zvýšení účinnosti. Uzavřením celého zařízení je možné využití jiných pracovních médií než vzduch, začalo být uvažováno s heliem o přetlaku 0,5 MPa. Takto by musela být konstrukce čtvrtvlnového rezonátoru velmi robustní, proto bylo přistoupeno k rezonátoru půlvlnovému s odrazivou plochou na konci. Návrh číslo 2 obsahuje menší 4“ reproduktor o výkonu 50 W pracující s frekvencí 1000 Hz, navazující přímo na rezonátor kruhového průřezu o průměru 80 mm. Stack by byl vyroben z keramického substrátu pro katalyzátory se sítí čtvercových otvorů 2 x 2 mm. Na začátku a na konci by ke stacku těsně přiléhaly tepelné výměníky. Tepelnými výměníky šířky 20 mm by byly měděné destičky tloušťky 0,3 mm naskládané tak, aby navazovaly na otvory stacku a teplo by se přenášelo tepelnými trubicemi k vnějším výměníkům.



Obrázek 4.2: Návrh číslo 2

Ocel není nejvhodnějším materiálem na stavbu rezonátoru z důvodu tepelné vodivosti a bylo by komplikované vyrobit ocelovou součást zařízení s tepelnými výměníky. Také reproduktor by v této konfiguraci generoval jen malé hodnoty amplitudy akustického tlaku, došli jsme proto k rozhodnutí, že musí být navrženo další zařízení.

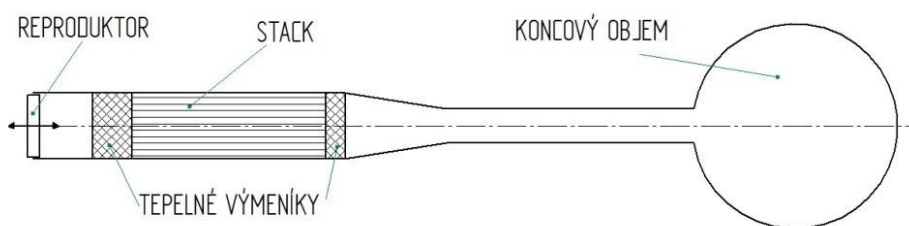
4.3 Výsledný návrh

Po předchozích návrzích a učiněných poznatkách bylo přistoupeno k finálnímu návrhu. Protože Tomáš Tisovský ve své diplomové práci ^[11] určil několik konfigurací TA chladicího zařízení, bylo rozhodnuto, že jedna z jeho výsledných konfigurací (viz *tabulka 1*) bude použita jako předloha pro návrh našeho konečného zařízení. Některé další rozměry (neobsažené v *tabulce 1*) jsou také čerpány z práce Tisovského a byly na základě simulací určeny jako ideální pro dosažení maximální hodnoty chladicího faktoru.

p _m [MPa]	f [Hz]	T _C [K]	p ₀₁ [kPa]	L _{rez} [mm]	$\frac{x_s}{L}$ [1]	$\frac{d}{D}$ [1]	$\frac{y_0}{\delta_k}$ [1]	y ₀ [mm]	
0,5	500	260	41,2	414	0,274	0,78		0,5	
ε _{ch} [1]	$\frac{\epsilon_{ch}}{\epsilon_{ch_ideal}}$ [1]	η _{ea} [1]	Ẇ _{el} [W]	Ẹ [W]	Q̇ _C [W]	Q̇ _H [W]	Re ^{δ_v} _{max_stack} [1]	Re ^{δ_v} _{max_rez} [1]	∇T _{krit} [$\frac{K}{m}$]
0,65	0,10	0,54	100	54	35	135			

Tabulka 1: Počáteční parametry navrženého TA chladicího zařízení T. Tisovským^[11]

Tyto teoretické hodnoty založené na výsledcích simulačního programu DeltaEC byly získány z numerického modelu termoakustického chladicího zařízení. Model předpokládal geometrii zařízení podobnou té na *Obrázku 4.5*. Jedná se tedy o čtvrtvlnovou konfiguraci s otevřeným prostorem na konci rezonátoru reprezentovaným kulovým koncovým objemem. Jako pracovní médium je předpokládáno helium pod tlakem 0,5 MPa



Obrázek 4.3: Schéma Čtvrtvlnového TA chladicího zařízení^[11]

S vedoucím práce jsme se domluvili na následujících skutečnostech. Budou zachovány tlak pracovního média $p_m = 0,5$ MPa a frekvence $f = 500$ Hz. Rezonátor bude však půlvlnový, jeho délka se tedy zdvojnásobí na $L_{rez} = 828$ mm (vzdálenost od reproduktoru k uzavřenému konci) a to z důvodu nahrazení konstrukčně složitěho kulového konce pevnou odrazivou

stěnou. Poloha stacku v rezonátoru bude zachována s ohledem na dosažení maximálního tepelného výkonu, protože je však rezonátor půlvlnový hodnota $x_s/L = 0,137$. Tepelná penetrační hloubka δ_k zůstává stejná, stejně tak i hodnota zásadní pro konstrukci stacku, tedy polovina tloušťky kanálku $y_0 = 0,5$ mm. Z důvodu konstrukční jednoduchosti není navrženo zúžení rezonátoru, neuvažujeme tedy parametr d/D . Výkonové parametry se budou odvíjet od použitého reproduktoru, protože je záměr osadit zařízení reproduktorem o výkonu navrhovaných 100 W, mohlo by být dosaženo i výše zmíněných tepelných výkonů.

4.4 Volba konstrukčního materiálu

Při volbě hlavního konstrukčního materiálu byly brány v potaz mechanické a fyzikální vlastnosti. Rezonanční trubice neboli rezonátor, musí mít dobré mechanické vlastnosti, nízkou tepelnou vodivost a dostatečnou tuhost. Běžné konstrukční kovy se nehodí z důvodů jejich vysoké tepelné vodivosti. Padlo rozhodnutí navrhnout zařízení z plastu, přesněji z polymethylmethakrylátu (PMMA) známý také jako plexisklo. Jedná se o termoplast, který svými vlastnostmi předčí všechny běžně využívané termoplasty a pro naše zařízení je vhodný z důvodů vysoké pevnosti, tvrdosti, tuhosti a tepelné odolnosti (viz *tabulka 2*).

	GS	XT	
Propustnost světla	92	92	%
Modul pružnosti	3200	3200	MPa
Mez pevnosti v tahu	80	72	MPa
Rázová houževnatost	15	15	KJ/m ²
Poměr prodl. při přetrh.	5,5	4,5	%
Koef. tepelné roztažnosti	0,07	0,07	mm/m °C
Měrná hmotnost	1,19	1,19	g/cm ³
Tepelná odolnost	80	70	°C
Elektrická odolnost	30	30	KV/mm
Tepelně izolační vlastnosti	1 mm - 5,8		W/m ² K
	3 mm - 5,6		
	5 mm - 5,3		
	10 mm - 4,4		
Index vzduchové neprůzvučnosti	1 mm - 23 dB		dB
	4 mm - 27 dB		
	6 mm - 29 dB		
	10 mm - 31 dB		
	15 mm - 34 dB		
	20 mm - 36 dB		

Tabulka 2: Materiálové vlastnosti PMMA (GS - lité, XT - extrudované)^[21]

Jednotlivé prvky zařízení jsou navrženy dle dodávaných polotovarů a celá konstrukce je bezpečně dimenzována na přetlak 0,4 MPa. Plexisklo je možné spojovat běžnými spojovacími prvky, dále za pomoci sváření, nebo lepení. Pro naši konstrukci je vhodná metoda lepení. Je možné použití lepidel na bázi dichlormetanu buď jednosložková, nebo vícesložková, zaručující těsnost. Vytvrzení lepidla probíhá buď za pomoci katalyzátoru, nebo UV záření. Pevnost lepeného spoje dosahuje cca 60 % pevnosti materiálu. Na trhu se nabízí například lepidlo ACRIFIX® 1 R 0190.

Jako další významný materiál v zařízení je měď, má výbornou tepelnou vodivost $\lambda_q = 386 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ a je vhodným materiálem pro tepelné výměníky a teplovodiče v našem zařízení.

V neposlední řadě je materiál stacku, tedy silikátová, nebo oxidová keramika s relativně vysokou měrnou tepelnou kapacitou c a nízkou tepelnou vodivostí $\lambda_q = 2$ až $4 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$, zaručující efektivní funkci celého termoakustického zařízení.

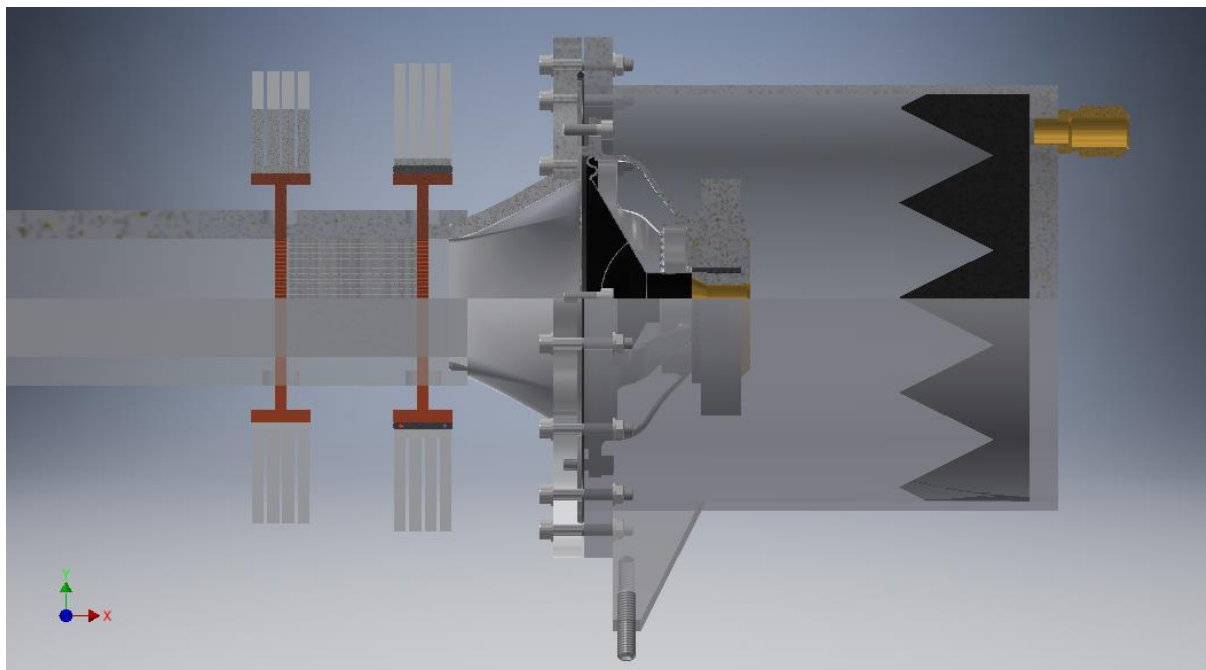
4.5 Popis komponentů výsledného zařízení

Na následujících řádcích jsou popsány všechny komponenty našeho navrženého termoakustického chladicího zařízení. Popis se vztahuje k výkresu sestavy a kusovníku (viz přílohy: BP_TA-TK-2016-00 a BP_TA-TK-2016-00-KS), dále jako přílohy k této práci jsou výrobní výkresy všech součástí TA chladicího zařízení, které je potřeba vyrobit.

Reproduktor a ozvučnice

Pod položkou číslo (1) se nachází středo-pásmový reproduktor Beyma 5G40Nd jmenovitého rozměru 5“ jehož kompletní specifikace je v příloze této práce. Reproduktor je na své rozměry relativně výkonný a může být zatížen výkonem 100 W špičkově až 200 W, při provozní frekvenci 500 Hz a napájení 2,83 V je schopen vytvářet akustický tlak 91 dB ve vzdálenosti 1 m od reproduktoru. Tyto hodnoty jsou však uvažovány za běžných podmínek a pro nás jsou nicneříkající. V našem zařízení bude reproduktor pracovat s heliem pod tlakem 0,5 MPa, akustický tlak vycházející z reproduktoru bude usměrněn a zvýšen v plynulém přechodu (7). Pouze na základě měření by bylo možné určit skutečný akustický tlak. Reproduktor bude napájen ze zesilovače nacházejícího se v laboratořích KEZ, zdrojem zvuku bude generátor tónu o frekvenci 500 Hz, případně je možné doladit frekvenci k dosažení maximálního chladicího výkonu.

Na *obrázku 4.6* je znázorněn detail ozvučnice a přiléhajících součástí. Reproduktor je upevněn pomocí čtyř šroubů (4) k desce reproduktoru (17). Deska reproduktoru je pomocí šroubů (6), matic (2) a podložek (3) připevněna k přírubě (16). Mezi přírubou a deskou reproduktoru je vsazen těsnící O-kroužek (5). K vnitřnímu otvoru příruby je přilepena trubka



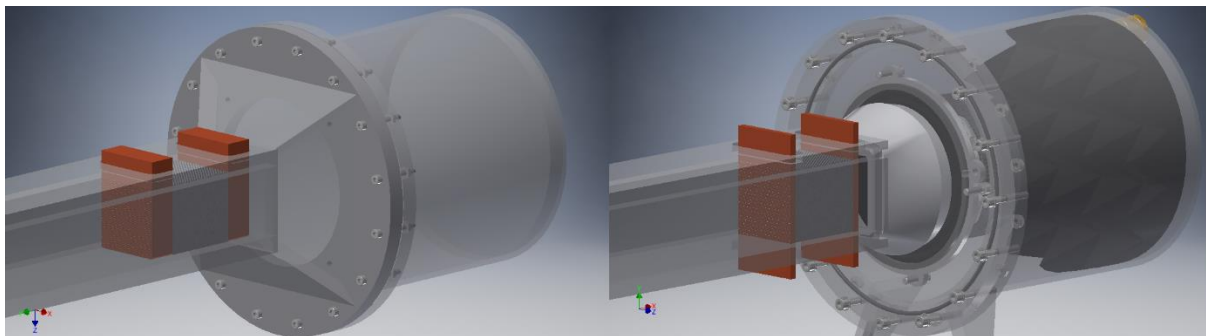
Obrázek 4.4: Pohled na čtvrtinový řez části zařízení

(13) a celá ozvučnice je uzavřena na druhé straně přilepeným víkem (11). Ve víku je v horní části našroubována hadicová rychlospojka (10), která slouží jako plnicí ventil pro naplnění celého systému pracovním plynem.

Reproduktory jsou běžně umísťovány do nádob – ozvučnic, které dokáží na základě své geometrie měnit vlastnosti vyzařovaného zvuku a zlepšují vlastnosti reproduktoru. Užitečnou vlastností může být změna (většinou snížení) rezonanční frekvence reproduktoru. Protože rezonanční frekvence našeho reproduktoru je $f_s = 110$ Hz, její snížení není potřeba. Další výpočty ideálního objemu ozvučnice jsou využívány v reproboxech v běžném prostředí. Literatura se zmiňuje o systému válce s pístem na pružině, jež dokáží srovnat rezonanční frekvenci reproduktoru a rezonátoru, tedy dosažení ideálního stavu a vyšší účinnosti. Konstrukčně je však systém komplikovaný a nebude v našem experimentálním zařízení použit. Pro naše zařízení je navržen objem ozvučnice cca 4 litry. Na opačné straně od reproduktoru je v ozvučnici umístěna akustická izolační pěna (12), která bude pohlcovat nežádoucí vibrace vzniklé v prostoru.

Protože je nutné k reproduktoru dovést napájecí vodiče, v desce reproduktoru bude vyvrtána díрка, kudy budou provlečeny napájecí kabely a případně kabely dalších snímačů. Následně bude otvor zalit epoxidovou pryskyřicí a po vytvrzení dojde k utěsnění tohoto prvku.

Přechodka profilů



Obrázek 4.5: Přechod profilů z desek a plynulý přechod.

Na druhé straně od reproduktoru navazuje vlastní rezonátor. Do otvoru v desce reproduktoru (17) je vlepen dílec přechodky profilů (7), který plynule přechází z průměru 100 mm na čtvercový profil 50 x 50 mm, což jsou vnitřní rozměry celého zbytku rezonátoru. V počátcích byl tento přechod navržen jako část jehlanu (viz *obrázek 4.7*), což by pravděpodobně způsobovalo množství ztrát, ale bylo by jednoduché nařezat díly z deskového PMMA a následně je slepit. Časem se ukázalo výhodné využití technologie 3D tisku, kdy na základě modelu, s jakkoli komplikovanými plochami a tvary, je možné vyrobit fyzický díl. Byla navržena přechodka profilů (7) s plynulým přechodem z kruhového profilu na čtyřhranný. Tisknutým materiálem je ABS, což je termoplast s velice dobrými vlastnostmi. Při tisku vzniká pórovitost materiálu, díl bude tedy po tisku obroušen a nalakován z důvodů hladkosti a neporéznosti povrchu proto, aby byla zaručena těsnost celého zařízení. Následně bude díl přilepen více zmíněným lepidlem (umožňujícím slepení těchto dvou různých plastů) ke zbytku zařízení.

Rezonátor

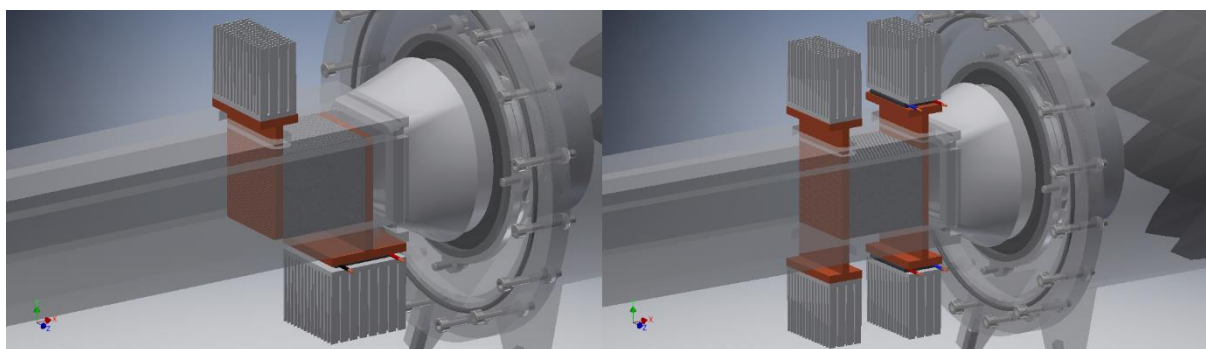
Rezonátor by měl mít kruhový průřez, v ideálním případě s proměnným průřezem, z důvodů minimalizace ztrát na vnitřních stěnách. Rozhodli jsme se vytvořit rezonátor čtvercový z konstrukčních důvodů tepelných výměníků a stacku. Součást se skládá ze dvou bočních desek (24) a ze dvou desek (23) s otvory pro tepelné výměníky. Na konci je rezonátor ukončen odrazovou deskou (25), která je z tvrzeného skla, což je velmi tvrdý materiál zaručující efektivní odraz akustických vln. Proto může být zařízení provozováno jako půlvlnové a nastává stojaté vlnění.

Stack

Stack (8) je vytvořen z materiálu používajícího se jako substrát katalyzátorů. Jedná se o keramický díl s velkým množstvím čtvercových otvorů o velikosti 1 x 1 mm s šířkou stěn mezi otvory 0,25 mm. Rozměry otvoru zhruba odpovídají dvojnásobku ideální polo-tloušťky, která ze simulací vycházela pro různé materiály kolem hodnoty 0,24 mm, parametr je závislý na penetrační hloubce. Oproti ideální polo-tloušťce je vhodné skutečný rozměr volit o něco větší, z toho důvodu je šířka kanálku 1 mm výhodná. Podobně byla stanovena ze simulací i délka stacku 55 mm. Stack je těsně obklopen tepelnými výměníky (9).

Tepelné výměníky

V počátcích bylo uvažováno, že na jedné straně rezonátoru bude otvor pro teplý a na opačné straně pro studený výměník (viz *obrázek 4.8*). Pro optimalizaci rovnoměrnosti teplotního pole jsou tepelné výměníky (9) vyvedeny po obou stranách zařízení a měly by zefektivnit tepelnou výměnu.



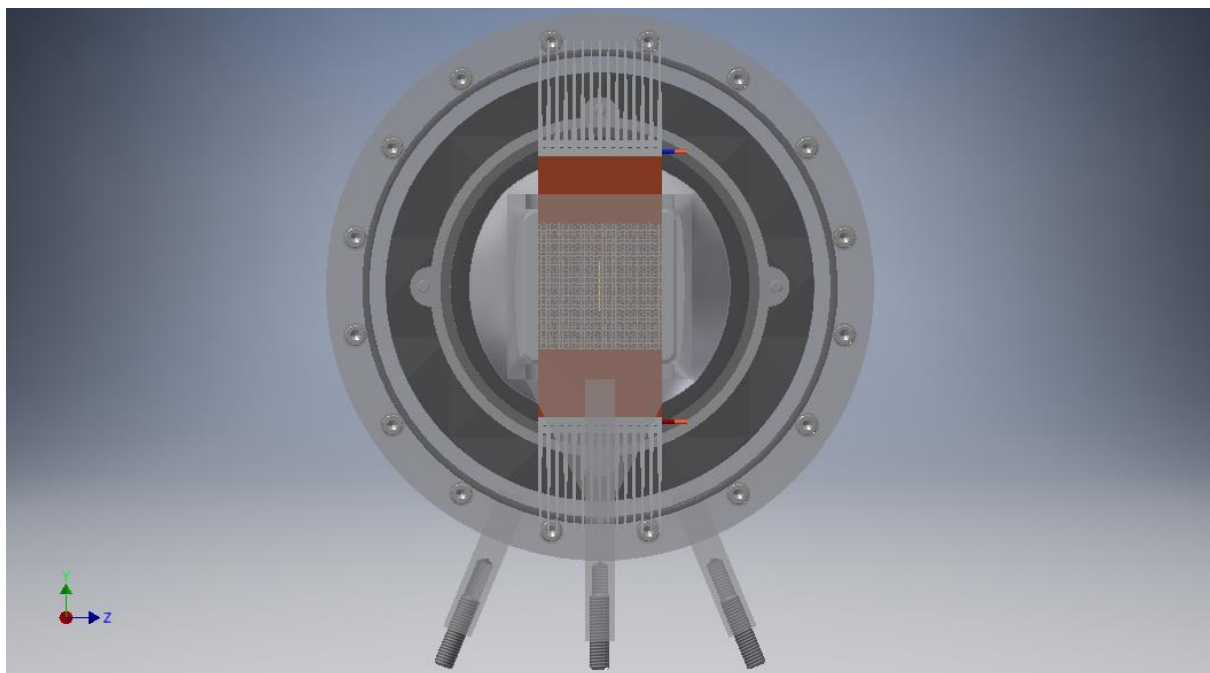
Obrázek 4.6: Uspořádání tepelných výměníků a chladičů

Z teorie vyplývá, že přes teplý tepelný výměník bude procházet větší tepelný tok, tím pádem by jeho rozměr měl být větší než u chladného výměníku. Protože samotná problematika tepelných výměníků je největší problém termoakustických zařízení a není zcela jasné, jak k samotnému návrhu výměníků přistupovat, s vedoucím práce byla určena šířka obou měděných výměníků 5 mm. V ideálním případě by měl profil výměníků plynule navazovat na profil stacku (8). Je pro nás však limitující technologie výroby, například elektroerozivním obráběním by se dal takový díl vyrobit, ale cena takového výměníku by byla velice vysoká a vznikl by další problém s odvodem tepla z těchto tenkých stěn. Další možností může být naskládání kovových (měděných nebo hliníkových) destiček s odvodem tepla pomocí tepelných tyčí tak, aby navazovaly na stack. Jako přijatelná technologie se zdálo být vyvrtání

kruhových otvorů. Na výrobním výkresu tepelného výměníku (viz příloha číslo BP_TA-TK-2016-09) je zřejmé uspořádání otvorů. Výměníky obsahují ve vertikálním směru nepatrně více materiálu, aby se teplo lépe šířilo k jejich koncům a přecházelo dále do teplovodů (20). Tyto teplovody slouží k šíření tepla do/z chladičů (18) respektive ohříváčů. Na teplé straně se nachází mezi teplovody a chladiči Peltierovy články (19). Ty pracují na základě Peltierova jevu a jejich účel je udržovat teplý výměník na teplotě 300 K. Peltierův článek je polovodičová destička, která po průchodu proudu z jedné strany chladí a z druhé hřeje. Vyrábí se v mnoha velikostech a pro naše účely budou použity články, které se nachází v laboratořích KEZ. Určení napájecích parametrů proběhne na základě experimentu. Chladiče (18) jsou běžné chladiče používané pro chlazení procesorů v počítačích, jejichž rozměry jsou upravené nařezáním.

Podpěry

Celé termoakustické chladicí zařízení je orientované ve vodorovné poloze. K základní konstrukci jsou přilepeny tři podpěry, umožňující zařízení stát, například na desce stolu. V části ozvučnice jsou přilepeny k dílům (13) a (16) dvě podpěry (14). Zhruba v polovině rezonátoru je zespodu přilepena třetí podpěra (21) společně s výztuhou (22). Ve všech podpěrách jsou našroubovány stavěcí šrouby (15), umožňující nastavení celého zařízení do stabilní polohy (viz obrázek 4.9). Kompletní zařízení, s celkovou délkou něco málo přes jeden metr, může být umístěno na pracovním stole.



Obrázek 4.7: Pohled z boku na TA chladicí zařízení

5. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout jednoduché termoakustické chladicí zařízení a provedení základních experimentů. Po studiu odborné literatury a již uskutečněných aplikací termoakustiky bylo úspěšně navrženo vlastní termoakustické chladicí zařízení. Konečnému návrhu předcházelo množství rozdílných konstrukcí a parametrů, na základě konzultací a požadavků bylo navrženo kompaktní zařízení, převážně z materiálu PMMA, jež je transparentní a celá konstrukce je velmi názorná. Vývoj probíhal na základě zkušeností s termoakustikou na katedře energetických zařízení a je dalším krokem k prosazení této alternativní koncepce do popředí zájmu. Na naší katedře se jedná o první návrh TA zařízení pro účely chlazení, jež bude sloužit pro následný výzkum a dovolí dalším studentům vycházet z tohoto zařízení k dosažení optimálních provozních parametrů a rovněž pro inspiraci k praktickému využití termoakustiky. Výsledkem je tedy výkresová dokumentace, podle níž je možné vyrobit a sestavit experimentální model, který po slepení a zkompletování bude sloužit pro provedení experimentů, jako měření chladicího výkonu, nastavení nejvýhodnějších parametrů reproduktoru. Bude možné na základě různých frekvencí zkoumat výkon s různými plyny a provozními tlaky. Jako dalším zajímavým experimentem by mohlo být určení skutečného akustického tlaku generovaného reproduktorem v oblasti stacku.

V neposlední řadě by bylo dobré zhotovit ve vhodném simulačním programu modální analýzu celé konstrukce, jež by určila její vlastní frekvenci. Výsledkem by byla oblast budící frekvence, při které by reproduktor neměl být provozován.

Bohužel v průběhu práce bylo učiněno rozhodnutí vedoucím práce, že se za současných okolností nebude zařízení prozatím realizovat, ačkoli již některé součásti, jako reproduktor či přechodka profilů, jsou připravené na KEZ a byla vypracována cenová nabídka na výrobu komponentů dodavatelskou firmou (AZ Plastik, spol. s r.o.). Z tohoto důvodu nebyli v současné době provedeny experimenty.

Seznam použitých zdrojů

- [1] N. Rott, Thermoacoustics, *Advances in Applied Mechanics* 20, 135–175, 1980.
- [2] IN 'T PANHUIS, Peter. *Mathematical Aspects of Thermoacoustics*. Eindhoven University of Technology, 2009. Dostupné z:
<http://alexandria.tue.nl/extra2/200911305.pdf>
- [3] B. Higgins, *Nicholson.s Journal I*, 130, 1802.
- [4] P.L. Rijke, „Notiz über eine neue Art, die in einer an beiden enden offenen Röhre enthaltene Luft in Schwingungen zu versetzen.„ *Ann. Phys.* 107, 339, 1859.
- [5] Sondhauss, C., Ueber die Schallschwingungen der Luft in erhitzten Glasröhren und in gedeckten Pfeifen von ungleicher Weite, *Ann. Phys.*, 79, 1, 1850.
- [6] Carter, R.L., White, M. and Steele, A.M., (Private communication of Atomics International Division of North American Aviation, Inc.), 1962.
- [7] Girgin İ., Türker M., *THERMOACOUSTIC SYSTEMS AS AN ALTERNATIVE TO CONVENTIONAL COOLERS*. *Journal of Naval Science and Engineering* 2012, vol.8, No.1, pp.14-32. Dostupné z:
http://www.dho.edu.tr/sayfalar/02_Akademik/Egitim_Programlari/Deniz_Bilimleri_Enstitusu/Dergi/04_2_TERMOAKUSTIK.pdf
- [8] Qiu, L.M., Sun, D.M., Yan, W.L., Chen, P., Gan, Z.H., Zhang, X.J. and Chen, G.B., *Investigation on a thermoacoustically driven pulse tube cooler working at 80 K*, *Cryogenics*, 45, 380-385, 2005.
- [9] IN'T PANHUIS P. H. M. W. *Mathematical Aspects of Thermoacoustics* [online]. Universiteit Eindhoven: Print Service Technische, 2003, 190 s. ISBN 978-90- 386-1862-3.
- [10] NOVOTNÝ P., VÍT, T., VESTFÁLOVÁ, M., LOPES, J., *Standing-Wave Thermoacoustic Engines*. *EPJ Web of Conferences* 010, 2012. Dostupné z:
http://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2012/07/epjconf_EFM2011_01061.pdf
- [11] TISOVSKÝ, Tomáš. *Analýza termoakustického chladicího zařízení*. Liberec, 2015. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Fakulta strojní. Vedoucí práce: Tomáš VÍT.
- [12] http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm
- [13] <http://www.ceramtec.cz/ceramic-materials/piezo-ceramics/>

[14] Z. Trávníček, A.-B. Wang, V. Lédl, T. Vít, Y.-C. Chen and F. Maršík . *Holographic-Interferometric and Thermoanemometric Study of a Thermoacoustic Prime Mover*. Journal of Mechanics, 29, pp 59-66. doi:10.1017/jmech.2012.110, 2013.

[15] UNITED STATES PATENT. *Thermoacoustic cooling device*. Barton L. SMITH. US2008120981A1. US 7,263,837 B2. Sep. 4, 2007

[16] http://fyzweb.cz/materialy/aplety_hwang/waveType/index.html

[17] http://www.si-gmbh.de/produktimg/Web_APA-Group.JPG

[18] http://www.pi-usa.us/products/images/300x250_images/P-604_Piezo_Actuator300.jpg

[19] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/400-elektrodynamicky-reproduktor>

[20] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/403-tlakove-reproduktory>

[21] http://www.plexisklo.eu/public/media/plexisklo_desky/prospekt-pexisklo-plexiglas.pdf

[22] <http://www.kez.tul.cz/files/kez-termoakustika.pdf>

TIJANI, Moulay El Hassan. *Loudspeaker-driven thermo-acoustic refrigeration*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2001, 170 s. ISBN 90-386-1829-8.

ŠESTÁK Jiří; RIEGER František. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000, 299 s. ISBN 80-01-01715-X.

SWIFT G. W. *Thermoacoustic engines*. The Journal of the Acoustical Society of America, Volume 84, Issue 4, October 1988. ISSN 0001-4966.

Seznam příloh

1. BP_TA-TK-2016-00
2. BP_TA-TK-2016-00-KS
3. BP_TA-TK-2016-07
4. BP_TA-TK-2016-08
5. BP_TA-TK-2016-09
6. BP_TA-TK-2016-11
7. BP_TA-TK-2016-13
8. BP_TA-TK-2016-14
9. BP_TA-TK-2016-16
10. BP_TA-TK-2016-17
11. BP_TA-TK-2016-20
12. BP_TA-TK-2016-21
13. BP_TA-TK-2016-22
14. BP_TA-TK-2016-23
15. BP_TA-TK-2016-24
16. BP_TA-TK-2016-25
17. Beyma 5G40Nd 1/2
18. Beyma 5G40Nd 2/2

1

2

3

4

A

B

C

D

E

F

25	Deska odraz	BP_TA-TK-2016-25	Tvrzené sklo	1
24	Deska rezonátoru bok	BP_TA-TK-2016-24	PMMA	2
23	Deska rezonátoru otvor	BP_TA-TK-2016-23	PMMA	2
22	Výztuha	BP_TA-TK-2016-22	PMMA	1
21	Podpěra L	BP_TA-TK-2016-21	PMMA	1
20	Teplovod	BP_TA-TK-2016-20	Měď	4
19	Peltierův článek	-	-	2
18	Chladič	-	Hliník	4
17	Deska reproduktoru	BP_TA-TK-2016-17	PMMA	1
16	Příruba 220	BP_TA-TK-2016-16	PMMA	1
15	Šroub stavěcí s vnitřním šestihranem M8	ISO 4026 - M8 x 30	Nerez	3
14	Podpěra R	BP_TA-TK-2016-14	PMMA	2
13	Trubka 180 x 4	BP_TA-TK-2016-13	PMMA	1
12	Akustická izolace	-	Molitan	1
11	Víko d172	BP_TA-TK-2016-11	PMMA	1
10	Rychlospojka 1/4" AG	-	-	1
9	Tepelný výměník	BP_TA-TK-2016-09	Měď	2
8	Stack	BP_TA-TK-2016-08	Silikátová keramika	1
7	Přechodka profilů	BP_TA-TK-2016-07	ABS	1
6	Šroub s válcovou hlavou s vnitřním 6hranem	ISO 4762 - M4 x 35	Ocel	16
5	O kroužek 185x3	DIN 3771 - 185 x 3	Přyz	1
4	Šroub s válcovou hlavou s vnitřním 6hranem	ISO 4762 - M5 x 16	Nerez	4
3	Podložka plochá	ISO 7089 - 4 - 140 HV	Nerez	32
2	Matice šestihranná M4	DIN 555-5 - M4	Nerez	16
1	Reproduktor 5" BEYMA 5G40/Nd	-	-	1
POZ.	NÁZEV - ROZMĚR (POZNÁMKA)	VÝKRES/NORMA	MATERIÁL	MN.

Změna		Datum	Index	Podpisy
Měřítka	Pozn.	Navrhl	Koňářík T.	20. 6. 2016
		Kreslil		
		Datum		
Číslo seznamu		Technolog		
Číslo sestavy		Normaliz.		
Starý výkres		Schválil		
Nový výkres		Datum		



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Název

TERMOAKUSTICKÉ CHLADÍCÍ ZAŘÍZENÍ

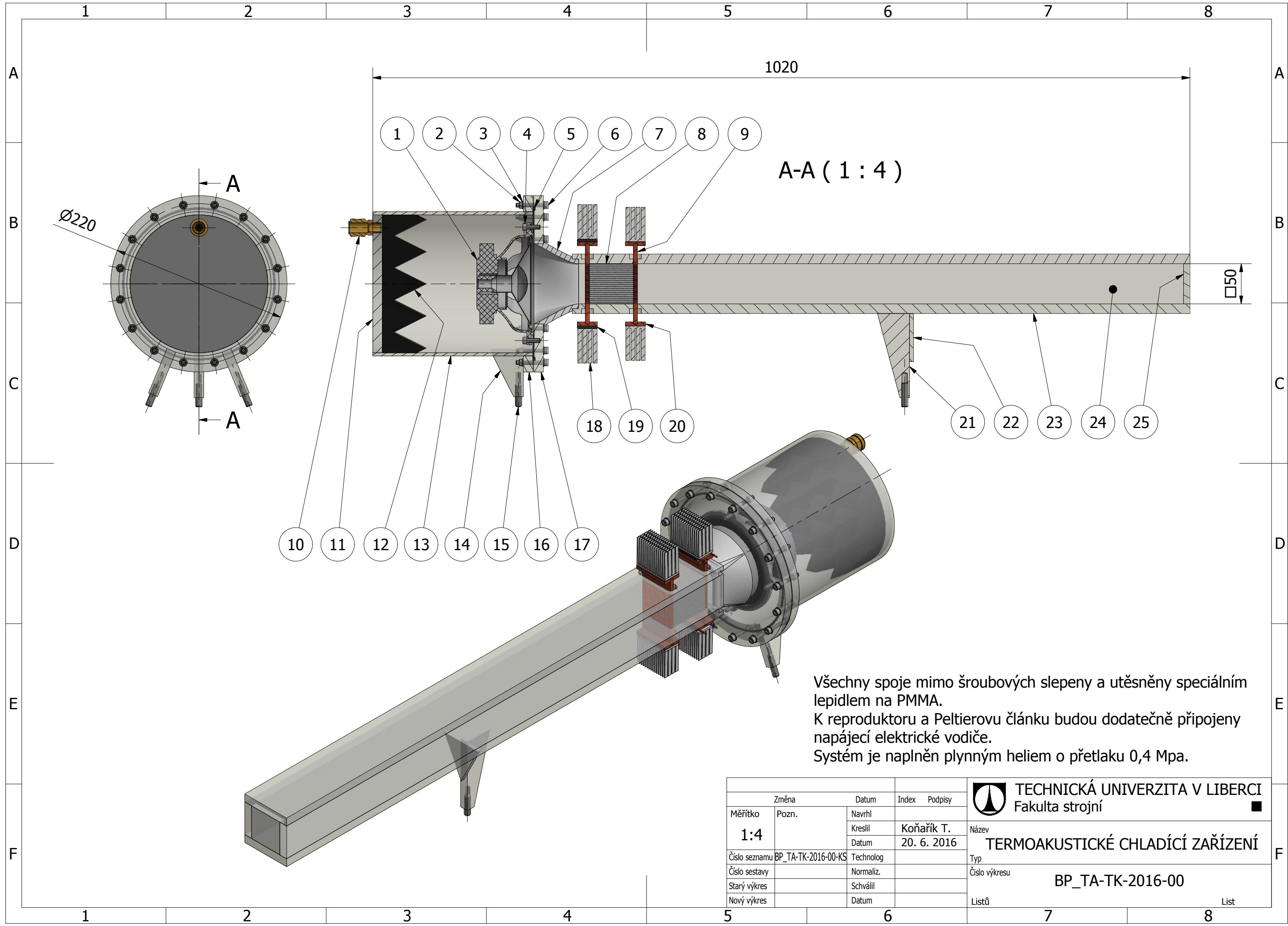
Typ

Číslo výkresu

BP_TA-TK-2016-00-KS

Listů

List



1

2

3

4

A

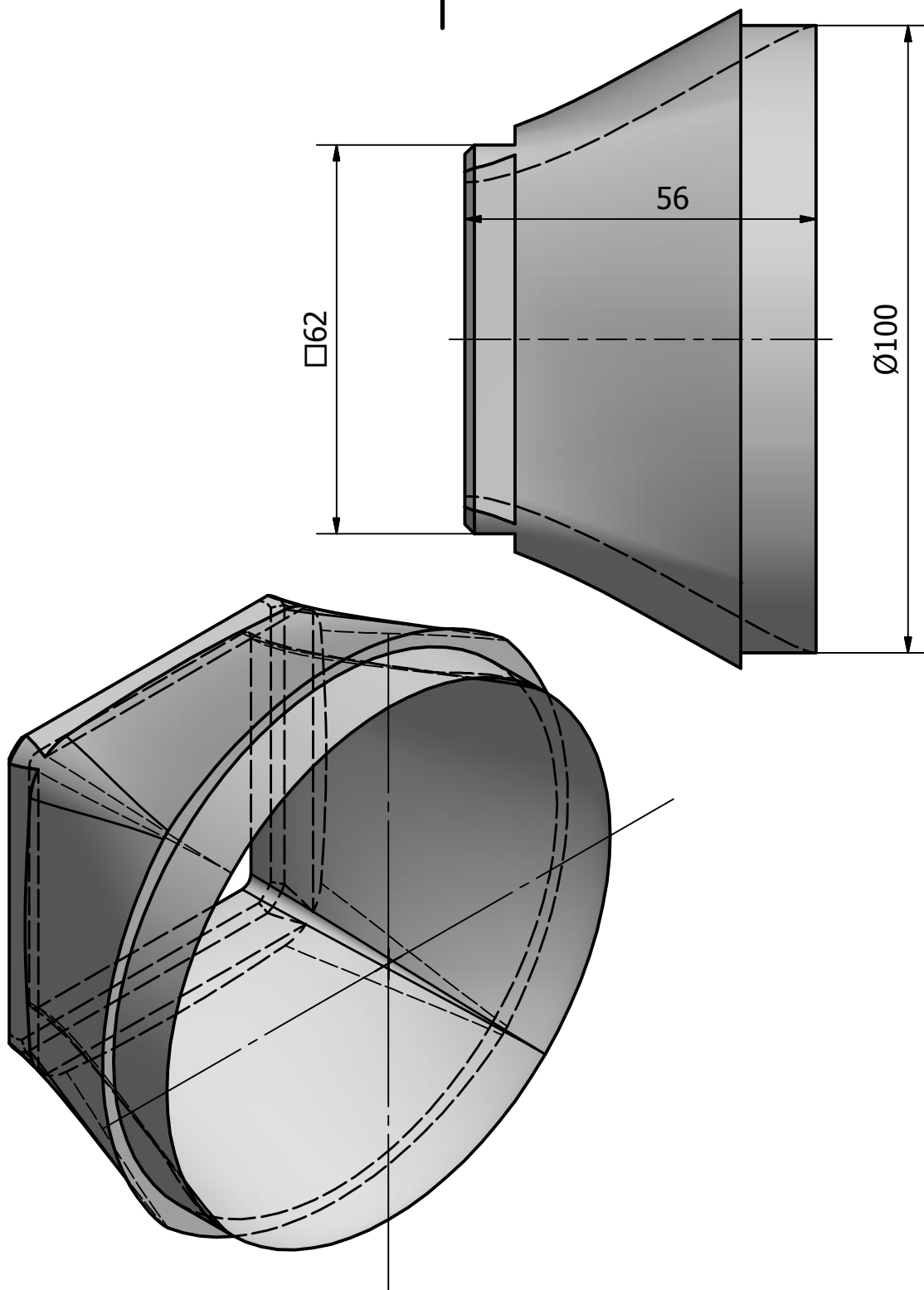
B

C



D

E

F



Na základě modelu vytisknutí na 3D tiskárně s výškou vrstvy 0,25 mm.



Rozm.-Polot.		ABS drát pro 3D tiskárny					PŘESNOST ISO 2768-mK	
		Materiál	ABS	Tř. odp.		Pozice	7	TOLEROVÁNÍ ISO 8015
		Č. hm.		Hr. hm.		Počet ks.	1	PROMÍTÁNÍ ISO-E 
		Změna	Datum	Index	Podpisy	 TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta strojní		
Měřítko	Pozn.	Navrhl						
1:1		Kreslil	Koňář T.	Datum		Název		
			20. 06. 2016			Přechodka profilů		
Číslo seznamu		Technolog				Typ		
Číslo sestavy	BP_TA-TK-2016-00	Normaliz.				Číslo výkresu		
Starý výkres		Schválil				BP_TA-TK-2016-07		
Nový výkres		Datum				Listů		
						List		

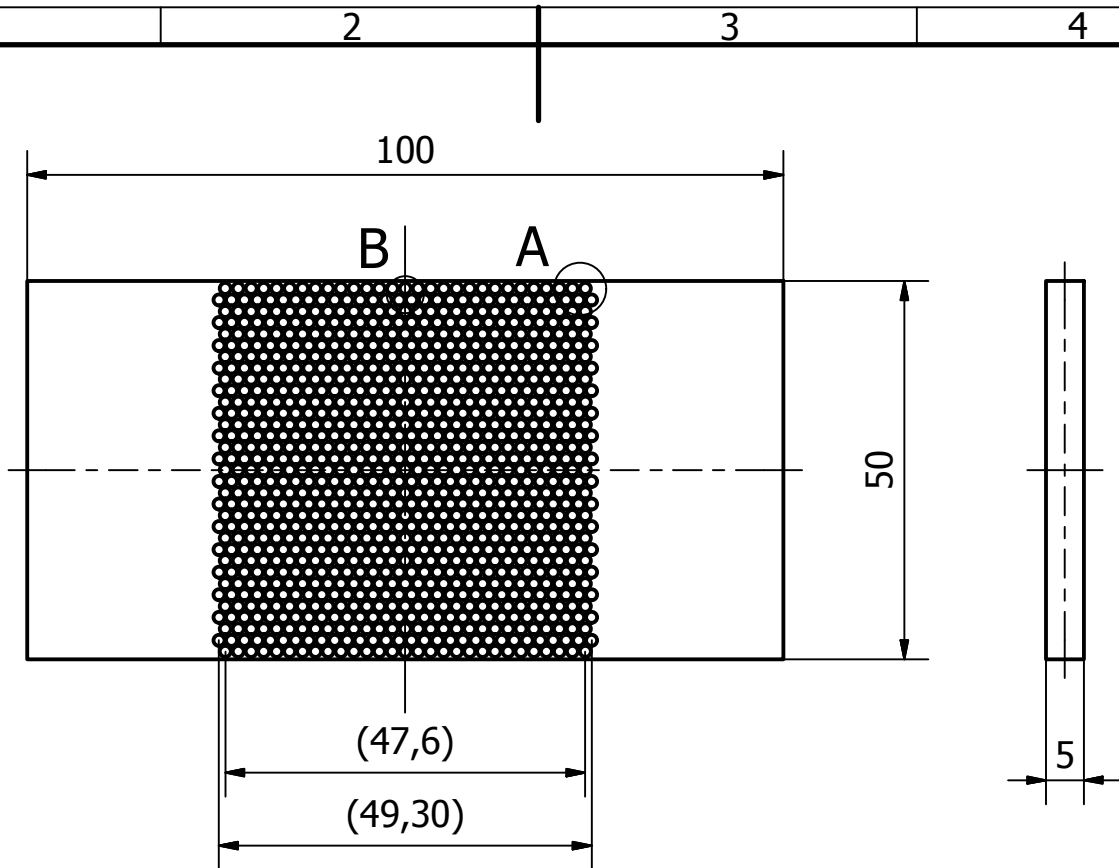
1		2		3		4		A	
								B	
								C	
								D	
								E	
								F	

□150

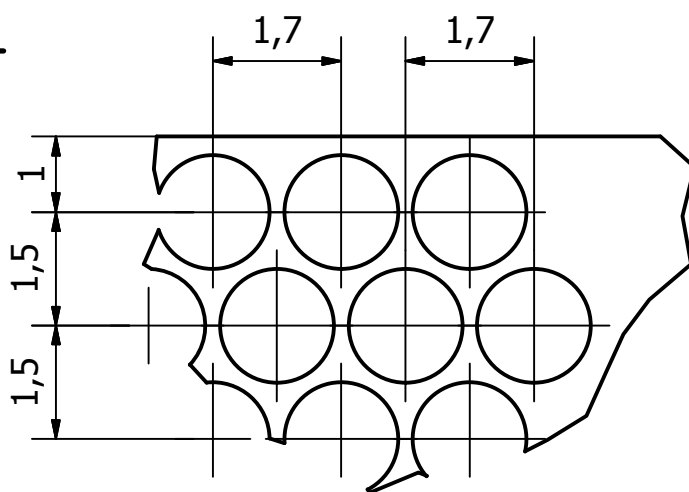
55

Průchozí otvory rovnoběžné s rozměrem 55.
Stěny stacku vybroušeny pro hladké zasunutí do rezonátoru.

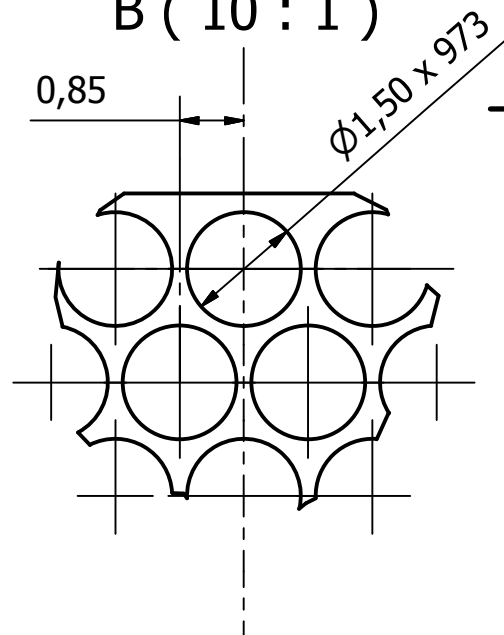
Rozm.-Polot.	Keramický substrát katalyzátorů se sítí děr 1 x 1 mm						PŘESNOST ISO 2768-mK	
	Materiál	Silikátová keramika	Tř. odp.		Pozice	8	TOLEROVÁNÍ ISO 8015	
	Č. hm.		Hr. hm.		Počet ks.	1	PROMÍTÁNÍ ISO-E 	
Změna		Datum	Index	Podpisy	 TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta strojní			
Měřítko	Pozn.	Navrhl	Název					
2:1		Kreslil	Stack					
		Datum	20. 6. 2016					
Číslo seznamu		Technolog	Typ					
Číslo sestavy	BP_TA-TK-2016-00	Normaliz.	Číslo výkresu					
Starý výkres		Schválil	BP_TA-TK-2016-08					
Nový výkres		Datum	Listů					
							List	




A (10 : 1)



B (10 : 1)



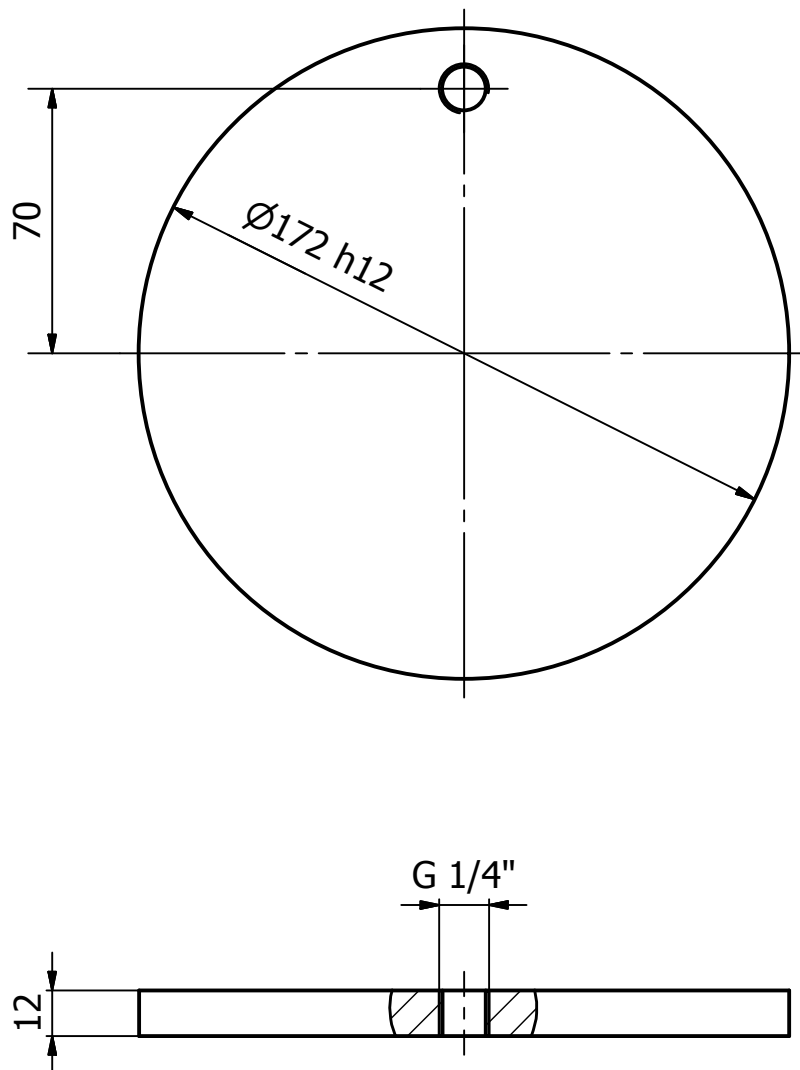
Pole děr pokrývá průřez rezonátoru o vnitřních rozměrech 50 x 50.
Ve směru rozměru 1,5 je 33 řad. Díry jsou rozloženy v řadách po 29 a po 30.

Rozm.-Polot.		Měděná deska					PŘESNOST ISO 2768-mK	
		Materiál	Měď	Tř. odp.		Pozice	9	TOLEROVÁNÍ ISO 8015
		Č. hm.		Hr. hm.		Počet ks.	2	PROMÍTÁNÍ ISO-E 
				<div> TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta strojní</div>				
Změna		Datum	Index					
Měřítka	Pozn.	Navrhl			Název Tepelný výměník			
2:1(10:1)		Kreslil	Koňářík T.					
		Datum	20. 6. 2016		Typ			
Číslo seznamu		Technolog						
Číslo sestavy	BP_TA-TK-2016-00	Normaliz.			Číslo výkresu BP_TA-TK-2016-09			
Starý výkres		Schválil						
Nový výkres		Datum			Listů			

Tepelný výměník

BP_TA-TK-2016-09

List



Rozm.-Polot.		Deska PMMA tl. 12 mm				PŘESNOST ISO 2768-mK	
		Materiál	PMMA	Tř. odp.		Pozice	11
		Č. hm.		Hr. hm.		Počet ks.	1
						TOLEROVÁNÍ ISO 8015	
						PROMÍTÁNÍ ISO-E	
Změna		Datum	Index	Podpisy	TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta strojní		
Měřítko	Pozn.	Navrhl					
1:2		Kreslil	Koňář T.	Název	Víko d172		
		Datum	20. 6. 2016				
Číslo seznamu		Technolog		Typ	BP_TA-TK-2016-11		
Číslo sestavy	BP_TA-TK-2016-00	Normaliz.		Číslo výkresu			
Starý výkres		Schválil					
Nový výkres		Datum		Listů			
					List		

1 2 3 4

A

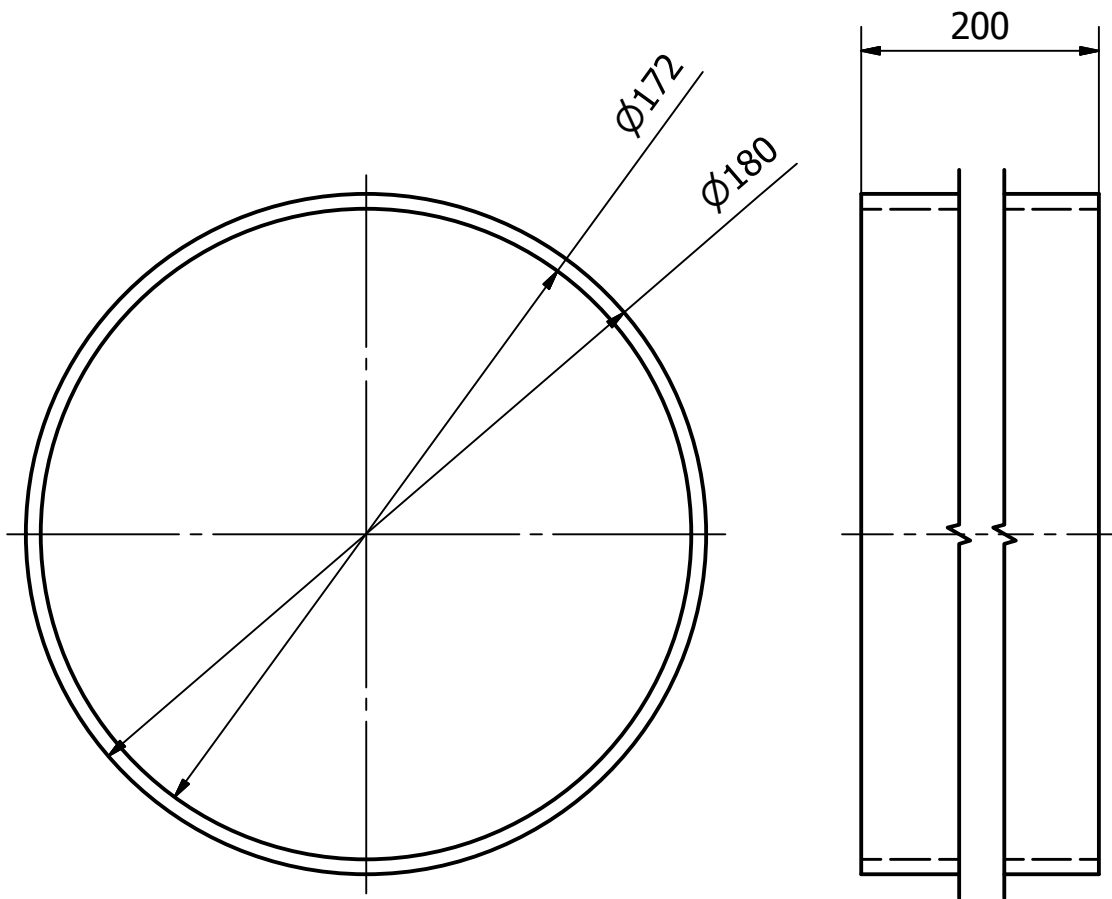
B

C

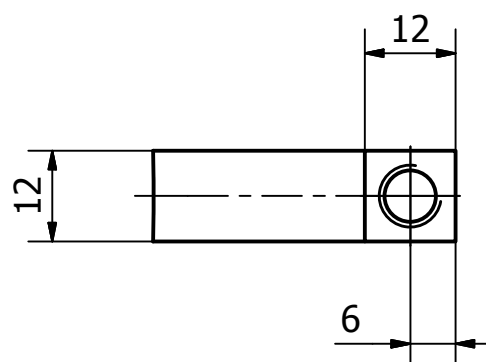
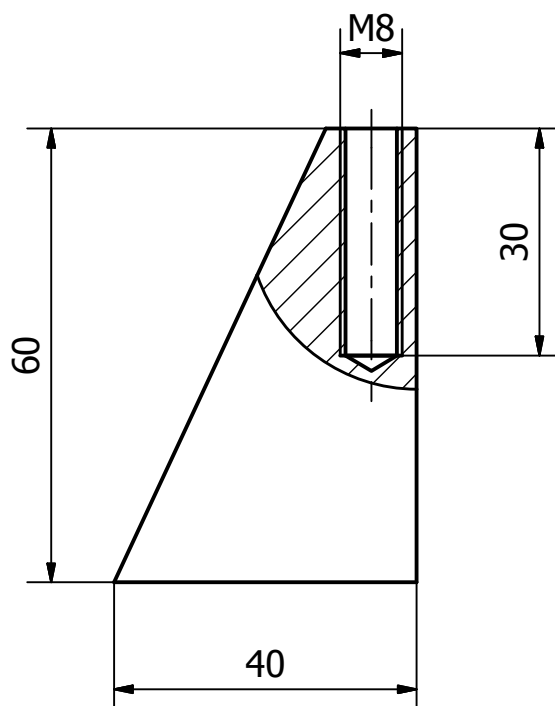
D

E

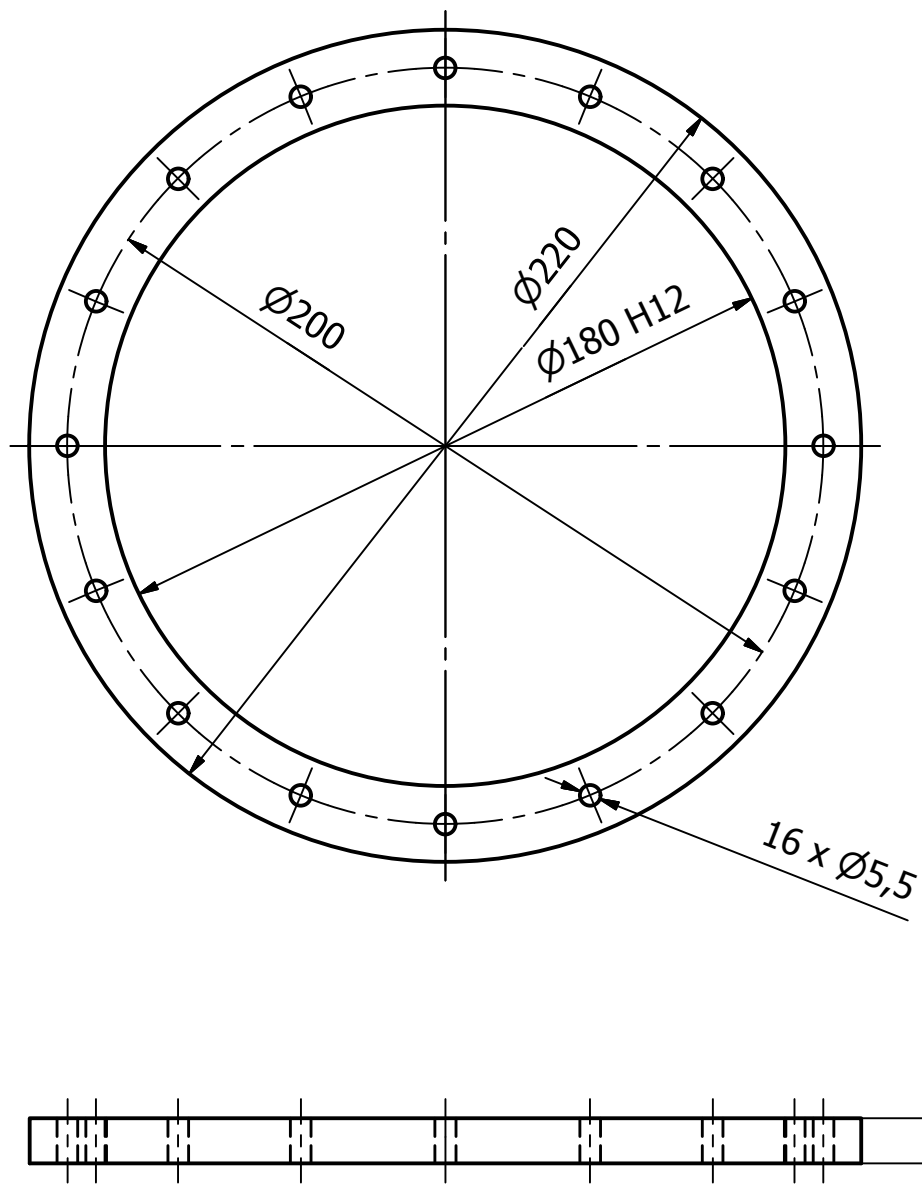
F



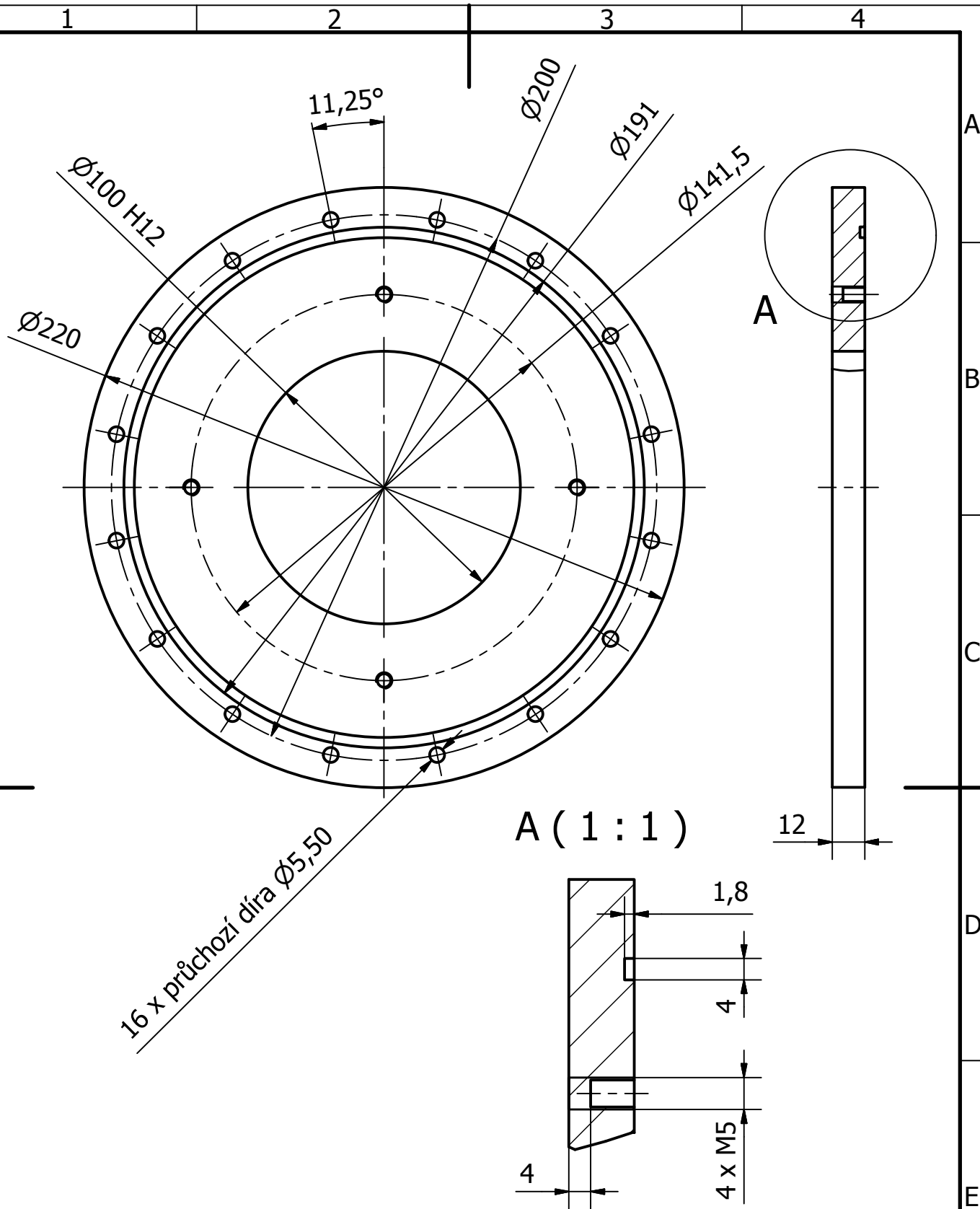
Rozm.-Polot.		Trubka PMMA 180 x 4						PŘESNOST ISO 2768-mK	
		Materiál		PMMA	Tř. odp.		Pozice	13	TOLEROVÁNÍ ISO 8015
		Č. hm.			Hr. hm.		Počet ks.	1	PROMÍTÁNÍ ISO-E
		Změna		Datum	Index	Podpisy			
Měřítko	Pozn.	Navrhl		Kreslil		Název			
1:2				Datum		Trubka 180 x 4			
Číslo seznamu		Technolog				Typ			
Číslo sestavy	BP_TA-TK-2016-00	Normaliz.				Číslo výkresu			
Starý výkres		Schválil				BP_TA-TK-2016-13			
Nový výkres		Datum				Listů			
List									





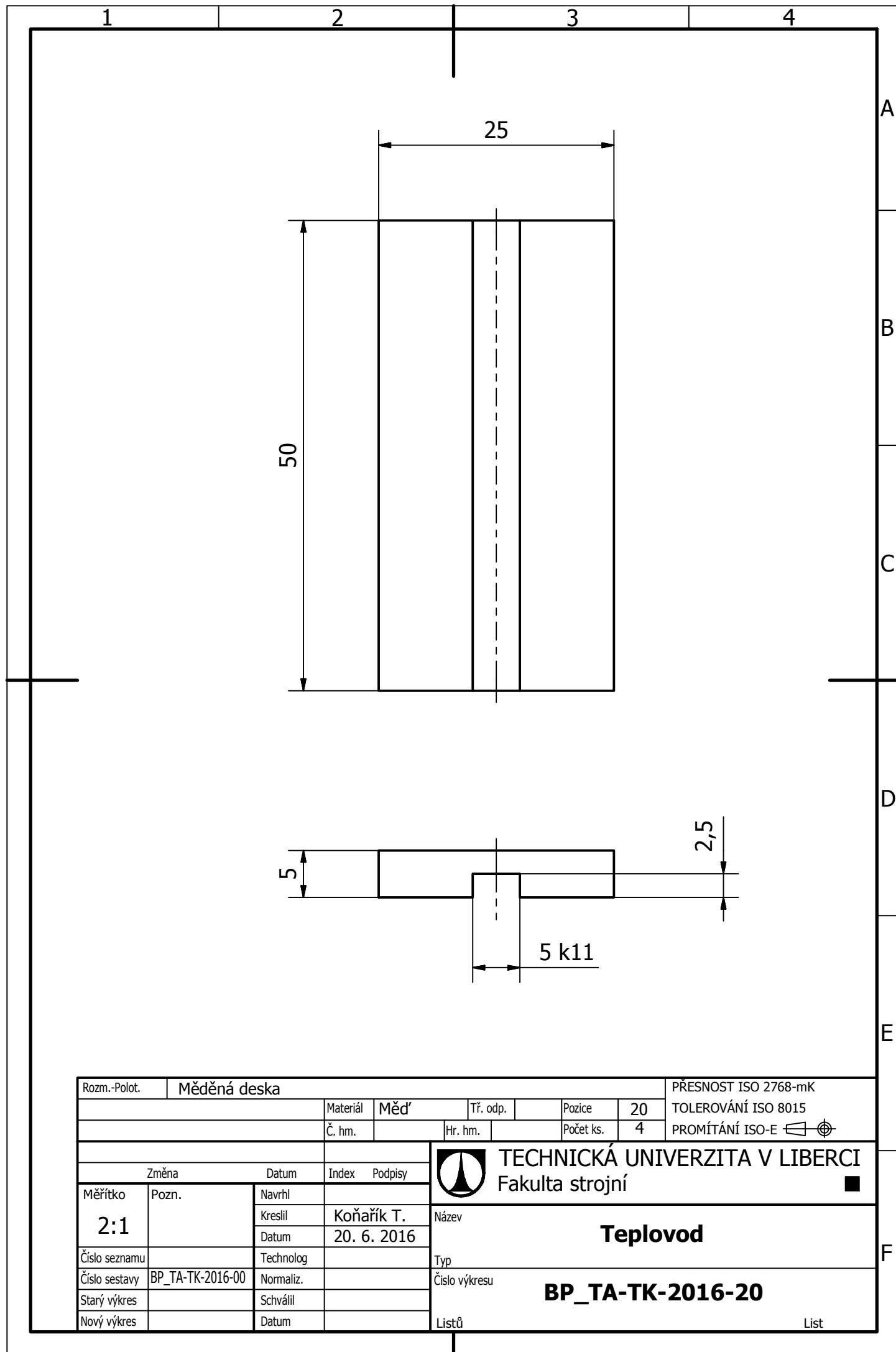
Rozm.-Polot.		Deska PMMA tl. 12 mm				PŘESNOST ISO 2768-mK	
		Materiál	PMMA	Tř. odp.		Pozice	14
		Č. hm.		Hr. hm.		Počet ks.	2
						TOLEROVÁNÍ ISO 8015	
						PROMÍTÁNÍ ISO-E	
Změna		Datum	Index	Podpisy	TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta strojní		
Měřítko	Pozn.	Navrhl					
1:1		Kreslil	Koňářík T.	Název	Podpěra R		
		Datum	20. 6. 2016				
Číslo seznamu		Technolog		Typ	BP_TA-TK-2016-14		
Číslo sestavy	BP_TA-TK-2016-00	Normaliz.		Číslo výkresu			
Starý výkres		Schválil					
Nový výkres		Datum		Listů			
					List		





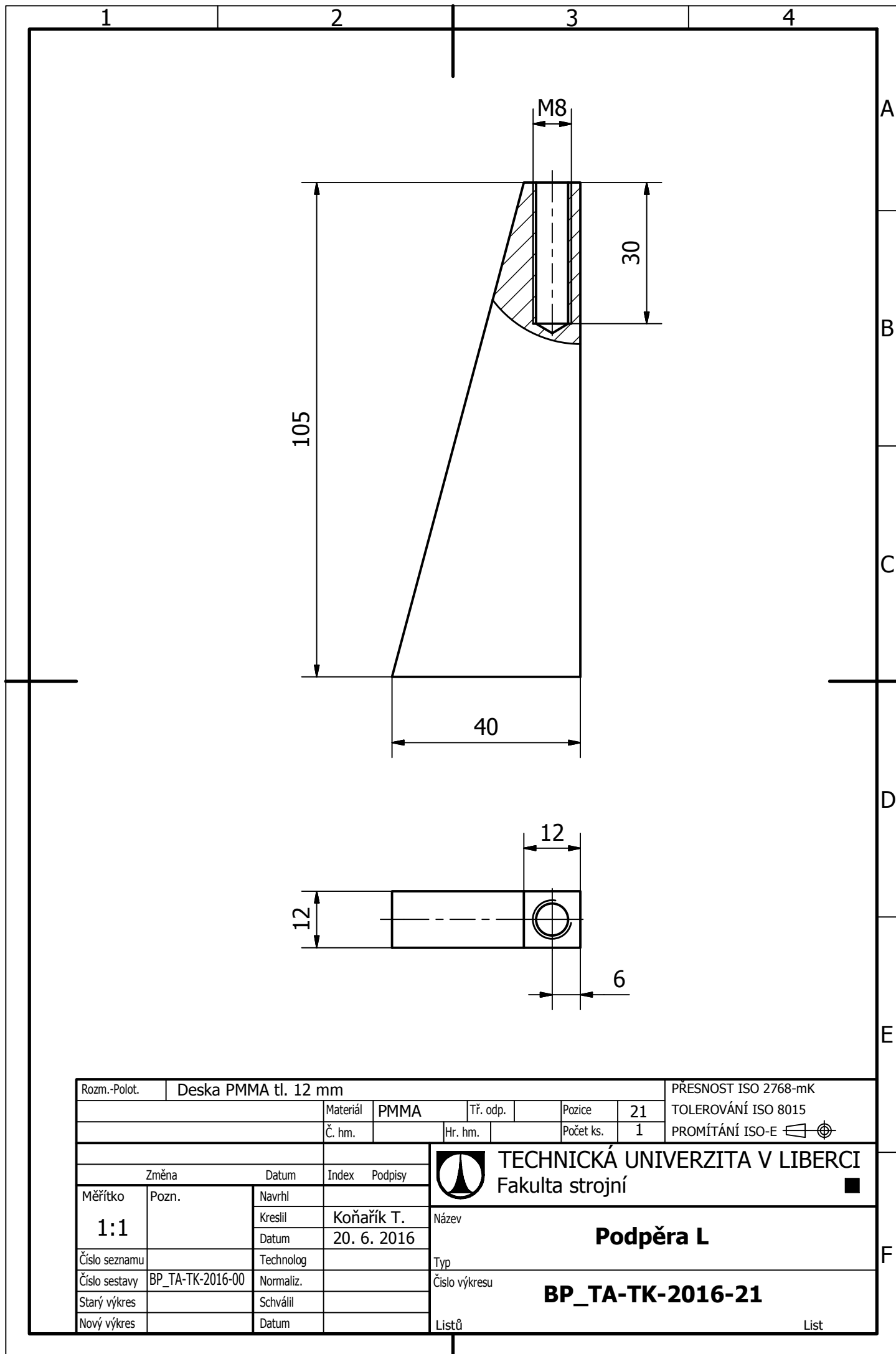
Rozm.-Polot.		Deska PMMA tl. 12 mm				PŘESNOST ISO 2768-mK	
		Materiál	PMMA	Tř. odp.		Pozice	16
		Č. hm.		Hr. hm.		Počet ks.	1
						TOLEROVÁNÍ ISO 8015	
						PROMÍTÁNÍ ISO-E	
Změna		Datum	Index	Podpisy	TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta strojní		
Měřítko	Pozn.	Navrhl					
1:2		Kreslil	Koňařík T.	Název	Příruba 220		
		Datum	20. 6. 2016				
Číslo seznamu		Technolog		Typ	BP_TA-TK-2016-16		
Číslo sestavy	BP_TA-TK-2016-00	Normaliz.		Číslo výkresu			
Starý výkres		Schválil					
Nový výkres		Datum		Listů			
					List		





Rozm.-Polot.		Deska PMMA tl. 12mm					PŘESNOST ISO 2768-mK	
		Materiál	PMMA	Tř. odp.		Pozice	17	TOLEROVÁNÍ ISO 8015
		Č. hm.		Hr. hm.		Počet ks.	1	PROMÍTÁNÍ ISO-E 
				<div> TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta strojní</div>				
Změna		Datum	Index					
Měřítko	Pozn.	Navrhl			Název Deska reproduktoru			
1:2(1:1)		Kreslil	Koňářík T.					
		Datum	20. 6. 2016		Typ BP_TA-TK-2016-17			
Číslo seznamu		Technolog						
Číslo sestavy	BP_TA-TK-2016-00	Normaliz.			Číslo výkresu BP_TA-TK-2016-17			
Starý výkres		Schválil						
Nový výkres		Datum			Listů List			



Rozm.-Polot.		Měděná deska					PŘESNOST ISO 2768-mK				
		Materiál	Měď		Tř. odp.		Pozice	20	TOLEROVÁNÍ ISO 8015		
		Č. hm.		Hr. hm.		Počet ks.	4		PROMÍTÁNÍ ISO-E 		
				 TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI							
				Fakulta strojní							
Změna		Datum		Index	Podpisy						
Měřítko 2:1	Pozn.	Navrhl		<div>Název Teplovod</div> <div>Typ</div> <div>Číslo výkresu BP_TA-TK-2016-20</div> <div>Listů</div> <div>List</div>							
		Kreslil								Koňářík T.	
		Datum								20. 6. 2016	
Číslo seznamu		Technolog									
Číslo sestavy	BP_TA-TK-2016-00	Normaliz.									
Starý výkres		Schválil									
Nový výkres		Datum									



Rozm.-Polot.		Deska PMMA tl. 12 mm					PŘESNOST ISO 2768-mK		
		Materiál	PMMA	Tř. odp.		Pozice	21	TOLEROVÁNÍ ISO 8015	
		Č. hm.		Hr. hm.		Počet ks.	1	PROMÍTÁNÍ ISO-E 	
				<div> TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta strojní</div>					
Změna		Datum	Index						Podpisy
Měřítka 1:1	Pozn.	Navrhl							
		Kreslil	Koňářík T.						
		Datum	20. 6. 2016						
Číslo seznamu		Technolog							
Číslo sestavy		BP_TA-TK-2016-00	Normaliz.						
Starý výkres			Schválil						
Nový výkres			Datum						
				<div><div>Název</div><div>Typ</div><div>Číslo výkresu</div><div>Listů</div></div> <div><div>Podpěra L</div><div>BP_TA-TK-2016-21</div><div>List</div></div>					

1 2 3 4

A

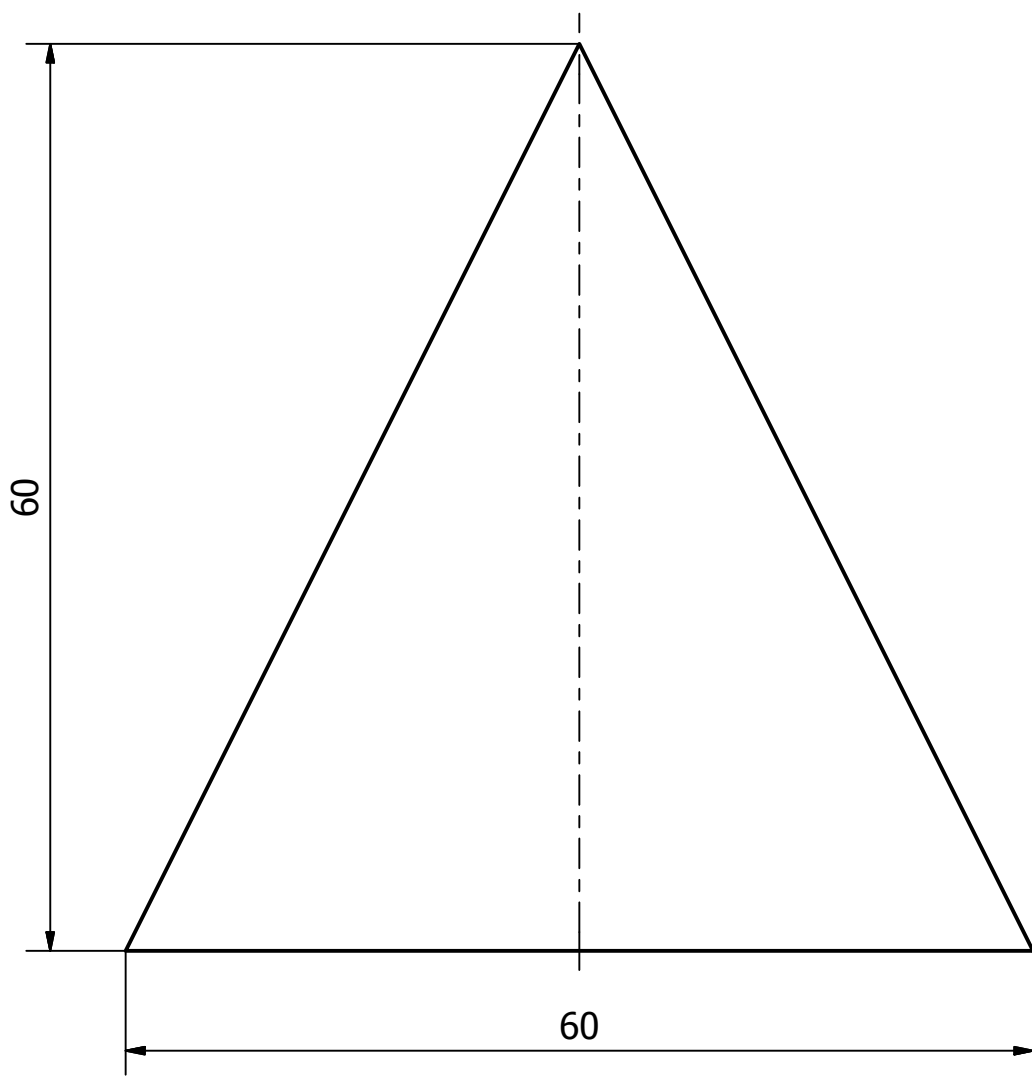
B

C

D

E

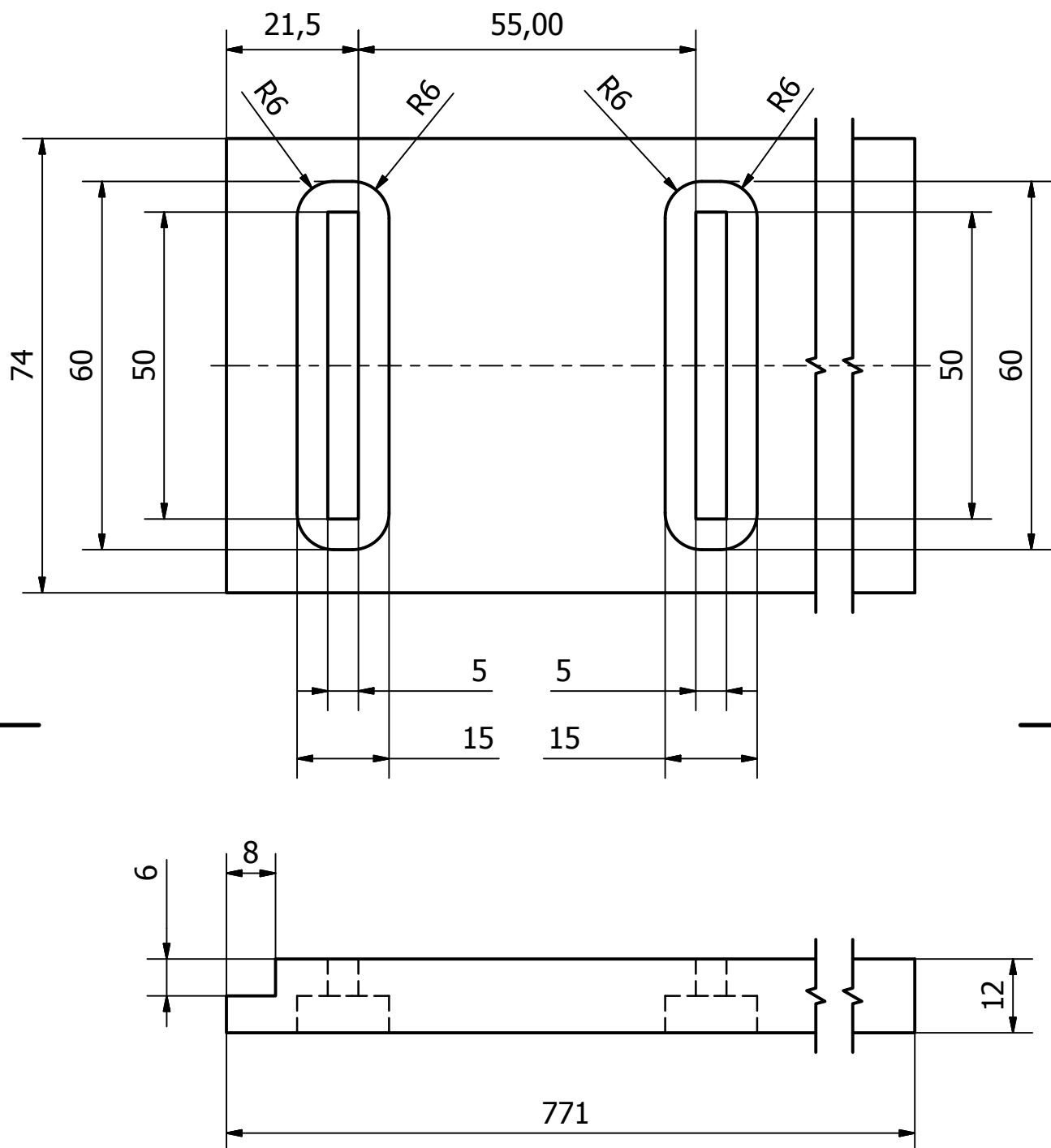
F




Rozm.-Polot.		Deska PMMA tl. 5 mm				PŘESNOST ISO 2768-mK	
		Materiál	PMMA	Tř. odp.		Pozice	22
		Č. hm.		Hr. hm.		Počet ks.	1
						TOLEROVÁNÍ ISO 8015	
						PROMÍTÁNÍ ISO-E	
		Změna		Datum	Index	Podpisy	
Měřítko	Pozn.	Navrhl		Kreslil		Datum	
2:1				Koňářík T.		20. 6. 2016	
Číslo seznamu		Technolog		Typ		Název	
Číslo sestavy	BP_TA-TK-2016-00	Normaliz.		Číslo výkresu		Výztuha	
Starý výkres		Schválil				BP_TA-TK-2016-22	
Nový výkres		Datum		Listů		List	



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



Rozm.-Polot.		Deska PMMA tl. 12 mm					PŘESNOST ISO 2768-mK	
		Materiál	PMMA	Tř. odp.		Pozice	23	TOLEROVÁNÍ ISO 8015
		Č. hm.		Hr. hm.		Počet ks.	2	PROMÍTÁNÍ ISO-E 
				<div> TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta strojní</div>				
Změna		Datum	Index	Podpisy				
Měřítko	Pozn.	Navrhl			Název			
1:1		Kreslil	Koňářík T.					
		Datum	20. 6. 2016		Deska rezonátoru otvor			
Číslo seznamu		Technolog						
Číslo sestavy	BP_TA-TK-2016-00	Normaliz.			Číslo výkresu			
Starý výkres		Schválil						
Nový výkres		Datum			BP_TA-TK-2016-23			
				Listů	List			

List

1

2

3

4

A

B

C

D

E

F


771

50

6

12

8

Rozm.-Polot.		Deska PMMA tl. 12 mm						PŘESNOST ISO 2768-mK	
		Materiál	PMMA	Tř. odp.		Pozice	24	TOLEROVÁNÍ ISO 8015	
		Č. hm.		Hr. hm.		Počet ks.	2	PROMÍTÁNÍ ISO-E 	
Změna		Datum		Index		Podpisy			
Měřítko	Pozn.	Navrhl		Kreslil		Datum		Název	
1:1				Koňářík T.		20. 6. 2016		deska rezonátoru bok	
Číslo seznamu		Technolog						Typ	
Číslo sestavy	BP_TA-TK-2016-00	Normaliz.						Číslo výkresu	
Starý výkres		Schválil						BP_TA-TK-2016-24	
Nový výkres		Datum						List	

KEY FEATURES

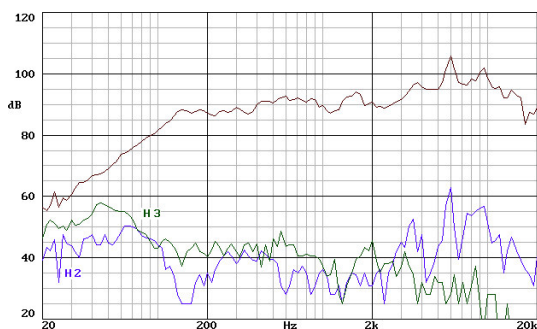
- Excellent sensitivity (93 dB)
- Good power handling (100 w AES)
- 1.5" (38.5 mm.) aluminium voice coil
- Designed for compact bass-reflex applications
- Low weight due to the neodymium magnet system
- Optimized for the use in line array systems



GENERAL DESCRIPTION

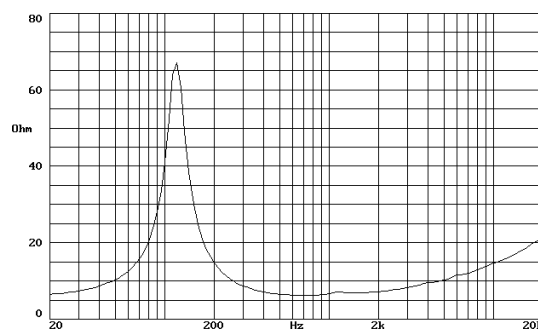
This low-mid frequency transducer is specially intended for line array applications. It is well known that is very important to reduce the distance between transducers in this kind of systems. Taking into account this design factor, a new basket with a special shape has been developed. This new basket allows the loudspeakers to be placed closer. By the other hand, the 5G40 characteristics have been optimized in order to fit in the most demanding line array designs. This model features a high power handling (100 w AES), an excellent sensitivity (93 dB) and an extended frequency response with very low distortion (thanks to the use of a copper ring). Moreover, its T-S parameters make possible to obtain an excellent bass response when used in small bass-reflex cabinets.

FREQUENCY RESPONSE AND DISTORTION CURVES

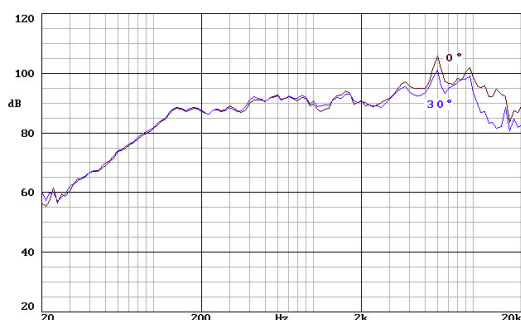


Note: on axis frequency response measured with loudspeaker standing on infinite baffle in anechoic chamber, 1w @ 1m.

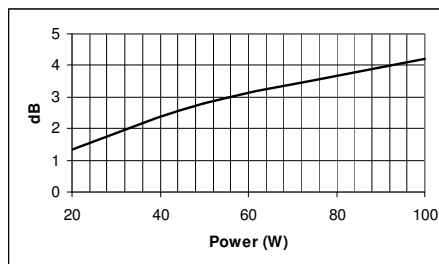
FREE AIR IMPEDANCE CURVE



FREQUENCY RESPONSE OUT OF AXIS



POWER COMPRESSION LOSSES



Note: These losses are calculated from a five minutes AES power test applying band limited pink noise (80-3500 Hz). The loudspeaker is free-air standing.

TECHNICAL SPECIFICATIONS

Nominal diameter	125 mm. 5 in.
Rated impedance	8 ohms.
Minimum impedance	8 ohms.
Power capacity *	100 w AES
Program power	200 w
Sensitivity	93 dB 2.83v @ 1m @ 2 π
Frequency range	90 - 17000 Hz
Recom. enclosure vol.	10 / 20 l 0.35 / 0.7 ft. ³
Voice coil diameter	38.5 mm. 1.5 in.
Magnetic assembly weight	1.2 kg. 2.64 lb.
BL factor	10 N / A
Moving mass	0.007 kg.
Voice coil length	9 mm.
Air gap height	7 mm.
X damage (peak to peak)	20 mm.

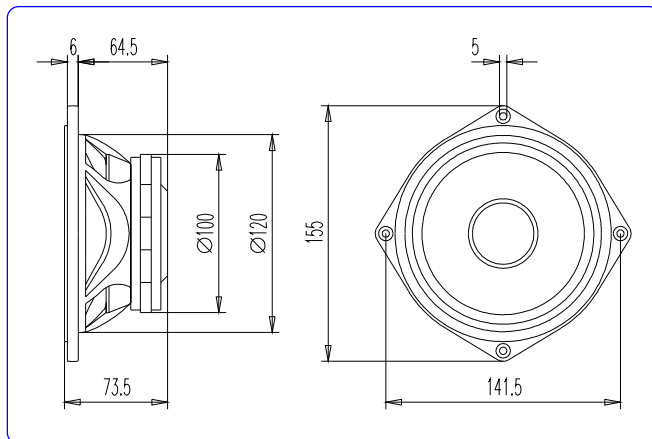
MOUNTING INFORMATION

Overall diameter	155 mm.	6.10 in.
Bolt circle diameter	141.5 mm.	5.57 in.
Baffle cutout diameter:		
- Front mount	120 mm.	4.72 in.
- Rear mount	120 mm.	4.72 in.
Depth	73.5 mm.	2.89 in.
Volume displaced by driver	0.5 l	0.019 ft. ³
Net weight	1.3 kg.	2.86 lb.
Shipping weight	1.8 kg.	3.96 lb.

THIELE-SMALL PARAMETERS **

Resonant frequency, fs	110 Hz
D.C. Voice coil resistance, Re	6.9 ohms.
Mechanical Quality Factor, Qms	4.9
Electrical Quality Factor, Qes	0.33
Total Quality Factor, Qts	0.31
Equivalent Air Volume to Cms, Vas	3.1 l
Mechanical Compliance, Cms	300 μ m / N
Mechanical Resistance, Rms	1 kg / s
Efficiency, η o (%)	1.2
Effective Surface Area, Sd (m ²)	0.0085 m ²
Maximum Displacement, Xmax	1 mm.
Displacement Volume, Vd	9 cm ³
Voice Coil Inductance, Le @ 1 kHz	0.4 mH

DIMENSION DRAWINGS



MATERIALS

- **Voice coil:** aluminium wire with high temperature bonding strength. Polyimide fiber glass former able to withstand high temperatures.
- **Cone:** light and stiff paper cone.
- **Surround:** treated cloth to assure good retaining of elasticity in despite of continuing use.
- **Spider:** treated cotton fibres.
- **Metal parts:** anti-corrosion coating to resist aggressive environmental conditions.
- **Basket:** specially designed die cast aluminium basket to reduce the distance between transducers.
- **Magnet:** high energy neodymium magnet.

Notes:

*The power capacity is determined according to AES2-1984 (r2003) standard. Program power is defined as the transducer's ability to handle normal music program material.

**T-S parameters are measured after an exercise period using a preconditioning power test. The measurements are carried out with a velocity-current laser transducer and will reflect the long term parameters (once the loudspeaker has been working for a short period of time).